

UNIVERSIDAD DE LA REPÚBLICA

FACULTAD DE AGRONOMÍA

**EVALUACIÓN DEL DRON COMO TECNOLOGÍA DE APLICACIÓN DE
HERBICIDAS**

por

**Facundo DOS SANTOS BIANCHI
María Valentina MINGO FERNÁNDEZ**

**Trabajo final de grado
presentado como uno de los
requisitos para obtener el
título de Ingeniero Agrónomo**

**MONTEVIDEO
URUGUAY
2025**

Este Trabajo Final de Grado se distribuye bajo licencia
“Creative Commons **Reconocimiento – No Comercial – Sin Obra Derivada**”.



PÁGINA DE APROBACIÓN

Trabajo final de grado aprobado por:

Director/a:

Ing. Agr. (Dra.) Juana Villalba

Tribunal:

Ing. Agr. (Dra.) Juana Villalba

Ing. Agr. (Mag.) Jorge Volpi

Ing. Agr. (Dr.) Joaquín Peraza

Fecha:

2 de diciembre de 2025

Estudiante:

Facundo dos Santos Bianchi

María Valentina Mingo Fernández

AGRADECIMIENTOS

A nuestras familias, por su apoyo constante durante todo el proceso y por confiar siempre en nosotros; y a nuestros amigos por acompañarnos en cada etapa.

A la Facultad de Agronomía y Estación Experimental “Dr Mario A. Cassinoni” por la oportunidad y el espacio para formarnos y a INIA La Estanzuela por permitirnos el espacio para desarrollar la investigación.

A nuestra tutora, Ing. Agr. Dra. Juana Villalba, por su orientación, dedicación y compartir con nosotros su conocimiento y experiencia.

A la Ing. Agr. Agustina Azcoitia, Ing. Agr. Dr. Alejandro García y Ing. Agr. Oscar Bentancur por su colaboración para realizar el trabajo.

A los funcionarios de Facultad de Agronomía e INIA La Estanzuela por su colaboración en el desarrollo del proyecto.

.

TABLA DE CONTENIDO

PÁGINA DE APROBACIÓN.....	3
AGRADECIMIENTOS	4
LISTA DE TABLAS Y FIGURAS	7
RESUMEN.....	9
ABSTRACT	11
1 INTRODUCCIÓN	12
2 REVISIÓN BIBLIOGRÁFICA	14
2.1 DRONES EN AGRICULTURA.....	14
2.2 DRONES EN APLICACIONES DE FITOSANITARIOS	15
2.2.1 Recuperación	16
2.2.2 Deposición	17
2.2.3 Eficiencia de control.....	18
2.2.4 Deriva	20
3 MATERIALES Y MÉTODOS	21
3.1 LOCALIZACION	21
3.2 DISEÑO EXPERIMENTAL Y TRATAMIENTOS.....	21
3.3 CARACTERIZACIÓN DEL ÁREA DE CADA EXPERIMENTO	22
3.4 METODOLOGÍA DE INSTALACIÓN	22
3.5 PREPARACIÓN DEL CALDO	23
3.6 DETERMINACIONES	24
3.6.1 Tasa de recuperación	24
3.6.2 Deposición	25
3.6.3 Eficiencia de control.....	26
3.7 ANÁLISIS ESTADÍSTICO	27
3.8 CONDICIONES METEOROLÓGICAS DURANTE LA APLICACIÓN ..	27
4 RESULTADOS Y DISCUSIÓN	32
4.1 TASA DE RECUPERACIÓN	32
4.1.1 Tarjetas hidrosensibles	32
4.1.2 Placas de Petri	34
4.2 DEPOSICIÓN.....	37
4.3 CONTROL.....	41
4.3.1 Experimento 1	41

4.3.2	Experimento 2.....	48
4.3.3	NDVI y su relación con el control	53
5	CONCLUSIÓN.....	56
6	BIBLIOGRAFÍA.....	57

LISTA DE TABLAS Y FIGURAS

Tabla N°

Tabla 1 Condiciones meteorológicas promedio durante el experimento 1	28
Tabla 2 Condiciones meteorológicas promedio durante el experimento 2	28
Tabla 3 Número de impactos/cm ² registrados en ambos experimentos	34
Tabla 4 Significancia estadística de los factores y su interacción en las placas de experimentos 1 y 2	35
Tabla 5 Significancia estadística de los factores y su interacción en las plantas del experimento	38
Tabla 6 Deposición (μg Tinopal/g MS) en el experimento 1 analizando la interacción entre factores	39
Tabla 7 Significancia estadística de los factores y su interacción en las plantas del experimento 2	39
Tabla 8 Significancia estadística de los factores y su interacción (p-valor) en el control	42
Tabla 9 Media ponderada (% control) de cada interacción a los 10 DPA	44
Tabla 10 Media ponderada (% control) de cada variable estudiada a los 17 DPA	45
Tabla 11 Media ponderada (% control) de cada interacción a los 27 DPA	48
Tabla 12 Significancia estadística de los factores y su interacción (p-valor) en el control	48
Tabla 13 Media ponderada (% control) de cada variable estudiada a los 10 DPA	50
Tabla 14 Media ponderada (% control) de cada variable estudiada a los 17 DPA	52

Figura N°

Figura 1 Croquis del diseño experimental, dirección del viento y del vuelo del experimento 1	22
Figura 2 Croquis del diseño experimental, dirección del viento y del vuelo del experimento 2	23
Figura 3 Evolución del viento durante el experimento 1	30
Figura 4 Evolución del viento durante el experimento 2	30
Figura 5 Recuperación sobre tarjetas hidrosensibles en el experimento 1	33
Figura 6 Recuperación sobre tarjetas hidrosensibles en el experimento 2	33
Figura 7 Efecto del volumen de aplicación en la recuperación en el experimento 1	35
Figura 8 Efecto del tamaño de gota en la recuperación en el experimento 1	36
Figura 9 Efecto del volumen en la recuperación en el experimento 2	36
Figura 10 Efecto del tamaño de gota en la recuperación en el experimento 2	37
Figura 11 Deposición en plantas en el experimento 2 al analizar el factor principal volumen	40
Figura 12 Deposición en plantas en el experimento 2 al analizar el factor principal tamaño de gota	40
Figura 13 Probabilidad de ocurrencia para la escala de control tratamientos 8 L/ha variando TG (10 DPA)	43
Figura 14 Probabilidad de ocurrencia para la escala de control tratamientos 16 L/ha variando TG (10 DPA)	43
Figura 15 Probabilidad de ocurrencia para la escala de control analizando factor TG (17 DPA)	45
Figura 16 Probabilidad de ocurrencia para la escala de control analizando factor volumen (17 DPA)	45
Figura 17 Probabilidad de ocurrencia para la escala de control tratamientos 8 L/ha variando TG (27 DPA)	47

Figura 18 Probabilidad de ocurrencia para la escala de control tratamientos 16 L/ha variando TG (27 DPA).....	47
Figura 19 Control y su probabilidad de ocurrencia analizando factor TG a los 10 DPA.....	49
Figura 20 Control y su probabilidad de ocurrencia analizando factor volumen a los 10 DP	49
Figura 21 Control y su probabilidad de ocurrencia analizando factor TG a los 17 DPA.....	51
Figura 22 Control y su probabilidad de ocurrencia analizando factor volumen a los 17 DP	51
Figura 23 Medición del índice verde (NDVI) en el experimento 1	54
Figura 24 Medición del índice verde (NDVI) en el experimento 2	55

RESUMEN

El uso de drones en la agricultura ha crecido exponencialmente en los últimos años, impulsado por los avances en agricultura de precisión y por las ventajas operativas que ofrecen frente a las aplicaciones terrestres, especialmente en condiciones de difícil acceso. Sin embargo, aún existe escasa información sobre su eficiencia en la aplicación de fitosanitarios y sobre cómo las variables operativas inciden en la deposición y el control de las malezas. El presente trabajo tuvo como objetivo evaluar la efectividad del herbicida glufosinato de amonio aplicado mediante un dron DJI Agras T40 bajo distintas configuraciones de volumen de aplicación (8 L/ha y 16 L/ha) y tamaño de gota (media: 250 μm y gruesa: 500 μm), en dos condiciones de vegetación: una pastura de *Dactylis glomerata* y un verdeo de *Avena sativa*. Los ensayos se realizaron en la Estación Experimental La Estanzuela (INIA, Colonia) bajo un diseño en franjas aleatorizadas, donde la unidad experimental fueron las placas de Petri y tarjetas en las determinaciones de la tasa de recuperación. Mientras que para la estimación de deposición la unidad experimental fue cada planta colectada y para el control fue la estación de muestreo donde se estimó la efectividad del herbicida. La aplicación se realizó con un trazador fluorescente (Tinopal) que a través de la medida de este en espectrofluorímetro, permitió la estimación de recuperación y deposición en plantas. El control además fue estimado a través del análisis de NDVI obtenido con un dron multiespectral. Los resultados mostraron que el volumen de aplicación fue el factor más determinante tanto en la deposición como en el control, obteniéndose mejores resultados con 16 L/ha respecto a los 8 L/ha. A su vez, el tamaño de gota tuvo un papel relevante, observándose mayores tasas de recuperación y deposición con gotas gruesas (500 μm), asociadas a una menor proporción de gotas derivables y mayor estabilidad durante la aplicación. En ambos experimentos, el volumen no afectó significativamente la tasa de recuperación, aunque se observó una tendencia positiva con mayores volúmenes. En cuanto a la deposición, se verificó una interacción significativa entre tamaño de gota y volumen en *D. glomerata*, donde la combinación de mayor volumen y gota gruesa generó los valores más altos de Tinopal recuperado. Respecto a la eficiencia de control, los tratamientos de 16 L/ha alcanzaron niveles de control superiores, coherentes con las diferencias observadas en la deposición y reflejadas en el NDVI. En síntesis, se demostró que el volumen de aplicación es la variable más influyente en la efectividad del glufosinato de amonio aplicado con dron. Estos resultados confirman el potencial del dron como herramienta viable para

aplicaciones de herbicidas, siempre que se seleccionen adecuadamente los parámetros operativos, contribuyendo a una mayor efectividad, reducción del impacto ambiental y mejora de la sustentabilidad de las prácticas agrícolas.

Palabras clave: dron, eficiencia, deposición, recuperación, control

ABSTRACT

The use of drones in agriculture has increased exponentially in recent years, driven by advances in precision agriculture and by the operational advantages they offer over ground applications, especially under limited field access conditions. However, there is still limited information regarding their efficiency in pesticide applications and how operational variables affect spray deposition and weed control. This study aimed to evaluate the effectiveness of glufosinate ammonium applied with a DJI Agras T40 drone under different configurations of spray volume (8 L/ha and 16 L/ha) and droplet size (medium: 250µm and coarse: 500µm) in two vegetation conditions: a *Dactylis glomerata* pasture and *Avena sativa* crop. The experiments were conducted at INIA La Estanzuela Station (Colonia, Uruguay) using a randomized strip design, with continuous recording of climatic variables. Spray recovery was assessed using water-sensitive cards and Petri dishes, with the concentration of a fluorescent tracer (Tinopal) measured. In addition, deposition on plants was quantified through the measurement of the same tracer (Tinopal) using a spectrofluorometry, and weed control efficiency was evaluated through visual assessment and NDVI analysis obtained by a multispectral drone. Results showed that the application volume was the most determining factor for both deposition and control, with significantly higher effectiveness at 16 L/ha compared to 8 L/ha. Droplet size also played a key role, with coarse droplets (500µm) resulting in greater recovery and deposition, associated with a lower proportion of driftable droplets and higher flight stability. Although spray volume did not significantly affect recovery, a positive trend was observed at higher volumes. In terms of deposition, a significant interaction between droplet size and volume was detected in *D. glomerata*, where the combination of higher volume and coarse droplets produced the highest Tinopal recovery. Regarding weed control, treatments with 16 L/ha achieved greater control levels, consistent with the differences observed in deposition and reflected in NDVI measurements. In summary, the spray volume was the most influential variable in the effectiveness of glufosinate applied by drone, while droplet size complemented its effect by improving product deposition on target. These results confirm the potential of drones as a viable tool for herbicide applications provided that operational parameters are properly selected, contributing to greater efficiency, reduced environmental impact and enhanced sustainability in agricultural practices.

Keywords: drone, efficiency, deposition, recovery, control

1 INTRODUCCIÓN

Las aplicaciones de fitosanitarios en Uruguay y el mundo, históricamente, se han realizado por vía terrestre y aérea (avión agrícola). Sin embargo, en la última década ha aumentado de forma significativa el uso de drones en la agricultura, impulsado por el avance de la agricultura de precisión. Este uso se ha extendido al monitoreo de chacras (Stehr, 2015).

Los drones son vehículos aéreos no tripulados (UAV) capaces de ser controlados remotamente o de forma autónoma y pueden ser utilizados para diversos propósitos. En un informe elaborado por DJI Agriculture se estimó que hay aproximadamente 400.000 drones agrícolas en uso para tratar 300 cultivos en 100 países diferentes. Esta cifra actual representa un aumento en uso a nivel mundial de 200% respecto al año 2020 (Newsroom Infobae, 2025). Particularmente en Uruguay también hubo un incremento en la comercialización de estas aeronaves, donde en el año 2022 se vendieron 30 drones, mientras que en el 2023, fueron 116 unidades, mostrando un aumento de 300% (“Se expande la utilización de drones…”, 2024).

El uso de drones en la agricultura presenta un nicho específico, que es la aplicación de fitosanitarios, donde entre sus principales ventajas se destaca la posibilidad de operar en condiciones en las que el acceso con maquinaria terrestre es limitado, como es el caso de “falta de piso”, situaciones posteriores a lluvias. En estos casos los drones permiten realizar aplicaciones sin necesidad de ingresar al terreno. Al tratarse de una tecnología aérea, se evita la compactación del suelo y el daño por pisoteo, lo que contribuye a preservar el rendimiento del cultivo.

Como consecuencia del incremento en su uso en los últimos años, aún se dispone de escasa información sobre cómo integrar adecuadamente las distintas variables involucradas para maximizar la eficiencia de las aplicaciones agrícolas. Existen diversos factores que en su conjunto determinarán la efectividad de la aplicación, donde particularmente destacan dos ramas principales: las condiciones operativas y las meteorológicas. Dentro de las condiciones operativas, las variables determinantes son el tamaño de gota, el volumen de aplicación, la velocidad de avance y la altura de vuelo. Por otro lado, respecto a las condiciones meteorológicas los factores determinantes son la velocidad del viento, la temperatura y la humedad relativa (J. Villalba, comunicación personal, 22 de abril, 2025). En este contexto de crecimiento exponencial de las

aplicaciones de fitosanitarios y la escasa información nacional en relación a la efectividad de las aplicaciones, se planteó como objetivo general de este trabajo. Evaluar la efectividad de glufosinato de amonio en dos configuraciones (tasa de aplicación y tamaño de gota) de dron DJI, modelo Agras T40. Siendo los objetivos específicos, a. estimar la tasa de recupero para esas configuraciones; b. estimar la deposición en plantas y efectividad del control de glufosinato de amonio; c. evaluar la aplicabilidad del índice NDVI para cuantificar control.

2 REVISIÓN BIBLIOGRÁFICA

2.1 DRONES EN AGRICULTURA

En los últimos años se comenzó a dar en nuestro país la introducción de drones para uso agrícola. Su utilización ha aumentado de forma exponencial, principalmente debido al enorme abanico de tareas que esta tecnología permite realizar.

Es posible obtener datos agronómicamente relevantes para diversas tareas, como por ejemplo para el mapeo de cobertura vegetal (Torres-Sánchez et al., 2013). Los drones se utilizan comúnmente para capturar imágenes aéreas, permitiendo obtener datos de alta resolución (Kawamura et al., 2021). Estos dispositivos aéreos proporcionan a los productores una vista aérea de los cultivos, lo que permite una forma más fácil y rápida de monitorear las chacras e identificar problemas potenciales (D. Wang et al., 2020). Lo que antes requería días de trabajo manual ahora se puede realizar en una fracción de tiempo, permitiendo una toma de decisiones más rápida y eficaz. Los drones son ahora una parte fundamental del agro, ya que ayudan a los productores a monitorear extensas parcelas y mantener los cultivos saludables (Gao et al., 2024).

El uso de imágenes basadas en UAV son importantes para la detección y clasificación de malezas (Kawamura et al., 2021). A su vez, el dron cubre múltiples longitudes de onda y puede discriminar entre malezas y cultivos utilizando diversos sensores (Bah et al., 2018).

Por otro lado, la utilización de drones permite realizar otras tareas como el asistir en caso de estreses abióticos, estimando por ejemplo la cantidad de nitrógeno (Zaman-Allah et al., 2015). Además, permite la detección temprana de enfermedades mediante fluorescencia de clorofila (Zarco-Tejada, 2012).

Sin embargo, el uso de drones no se limita solo a la obtención de imágenes o la exploración de enfermedades de los cultivos, plagas, malezas o déficit hídricos. Recientemente se han utilizado en tareas de aplicaciones a tasa variable, como la aplicación selectiva de herbicidas a ultra bajo volumen (Zhang et al., 2016).

Adicionalmente, como obtuvieron Artola Guynot de Boismenu y Pérez del Castillo López (2024) se puede cuantificar la biomasa de una pastura, con un dron multiespectral con la generación del modelo NDVI. A su vez, al medirse la altura con regla se pudo generar una relación entre el NDVI y la altura con correlaciones similares a la obtenida para NDVI y biomasa.

2.2 DRONES EN APLICACIONES DE FITOSANITARIOS

Como fue comentado, uno de los pilares fundamentales en el uso de drones en la agricultura es la aplicación de fitosanitarios, lo cual se ha convertido recientemente en un tema de gran interés para los productores. Fundamentalmente, se ha propuesto el uso de los mismos para la pulverización como un acercamiento a la agricultura de precisión y mejora de la productividad. A su vez, estas aeronaves ofrecen otros beneficios, destacándose una importante reducción de costos y una mayor practicidad, facilitando así el transporte y la operación (Palacios-Zuñiga et al., 2024).

Las investigaciones actuales se centran en perfeccionar la funcionalidad para aumentar considerablemente la efectividad de los productos fitosanitarios y reducir los fenómenos indeseados de deriva. Esta transición progresiva de las prácticas tradicionales a alternativas basadas en UAV representa un muy importante avance tecnológico en la protección fitosanitaria ofreciendo nuevas perspectivas para todos los actores presentes en la cadena agropecuaria (Khan et al., 2021).

En los últimos años, ha crecido notoriamente una postura focalizada en la utilización de bajos volúmenes por hectárea. No se conoce con certeza el efecto de la utilización de bajos volúmenes, por lo que a nivel mundial existen diversos proyectos de investigación centrados en esta variable. Hoy en día aún existe una brecha significativa en la investigación en lo que respecta a la utilización de bajos volúmenes de aspersión y la efectividad de los herbicidas (Paul et al., 2024).

El tamaño de gota utilizado es uno de los factores más importantes a tomar en cuenta, ya que en conjunto con el viento determina en gran medida la deriva y por lo tanto la tasa de deposición. Por otro lado, los parámetros operativos tienen mayor influencia en la distribución y penetración de las gotas, en donde la altura y velocidad de avance presentan gran impacto en la distribución de las gotas pulverizadas (Dengeru et al., 2022).

Respecto a la velocidad de avance, este es un factor importante en la determinación del ancho operativo. En un estudio realizado en Brasil se evaluó la influencia de la velocidad de vuelo sobre el ancho operativo de un dron. Particularmente fueron evaluadas dos velocidades (17.3 km/h y 21.6 km/h) con 2 volúmenes de aplicación diferentes (10 L/ha y 25 L/ha). Para la recopilación de datos el dron voló sobre un hilo de poliéster aplicando agua junto con un trazador fluorescente, para ser posteriormente medido en un espectrofluorímetro. Como resultados se observó que la velocidad de

desplazamiento del dron no tuvo una influencia significativa en el ancho de la franja de deposición para los dos volúmenes evaluados, para esa altura de vuelo, que fue 5.5 m. Esto sugiere que independientemente de la velocidad de desplazamiento, la uniformidad de la aplicación fue mantenida dentro de los estándares deseados. Es importante resaltar que la altura de vuelo y el tamaño de gota tienen una relación directa con el ancho de la franja de deposición, por lo que estas variables se mantuvieron fijas en el estudio. Generalmente, mayores alturas de vuelo y gotas más pequeñas suelen dar como resultado un rango de deposición más amplio (Silva et al., 2024).

2.2.1 Recuperación

La tasa de recuperación es un parámetro interesante de evaluar porque nos indica, indirectamente, más allá de la deposición y del nivel de control alcanzado, cuanto se pierde al ambiente y no llega al blanco u objetivo. Existen varios métodos para su estimación. En un trabajo realizado sobre el cultivo de arroz se investigó sobre dos volúmenes de aplicación (30 y 40 L/ha) con drones, con sistema de pulverización con boquillas hidráulicas en comparación con una mochila pulverizadora en la que se aplicaron 500 L/ha. Los resultados indicaron diferencias significativas en la cobertura del área dentro de las aplicaciones con drones. A su vez, no se observaron diferencias significativas en la densidad de gotas y uniformidad en la deposición entre las aplicaciones de drones, manteniendo constante el tamaño de gota. Se obtuvo mayor tamaño de gotas y volumen de aspersión en el tratamiento con mochila, generando mayor recuperación sobre las tarjetas evaluadas (Paul et al., 2024).

Hussain et al. (2019) evaluaron la recuperación de aplicaciones a diferentes alturas (1.5m - 2.0m - 2.5m y 3.0m) y con diferentes aperturas de boquilla, es decir distintas tasas de descarga. Se utilizó un trazador fluorescente para obtener el número de impactos/cm² sobre tarjetas hidrosensibles con el objetivo de determinar la uniformidad de la aplicación. Los resultados experimentales mostraron que a una altura de 1.5 m con una apertura de boquilla de 50%, 75% y 100% y velocidades de viento comprendidas entre 1.0 m/s y 5.0 m/s se obtuvieron resultados de pulverización uniformes. Por otro lado, al volar a una altura de 2 metros, una buena uniformidad se alcanzó con los mismos porcentajes de apertura de boquillas, pero velocidades de viento menores, estando las mismas entre 1.0 m/s y 3.8 m/s.

Según estos autores, en caso de aumentar la altura de vuelo a 2.5 m, aperturas de boquilla de 50%, 75% y 100% arrojaron resultados uniformes cuando la velocidad del viento era aún menor, particularmente menores a 2 m/s. Para velocidades de viento entre 2-3 m/s únicamente con aperturas de 75% y 100% se obtuvieron resultados uniformes, mientras que para una velocidad de 3.8 m/s solo 100% apertura permitió observar uniformidad en las tarjetas. La prueba de uniformidad de pulverización para una altura de 3m mostró patrones no uniformes en la mayoría de los ajustes de boquilla y velocidad de viento, donde las partículas se vieron fuertemente afectadas por la velocidad del viento y no alcanzaron las tarjetas hidrosensibles. Por lo tanto, la altura y la velocidad del viento son factores limitantes que pueden afectar la eficiencia general de la pulverización.

2.2.2 Deposición

En varias investigaciones se detectó que al aumentar la altura y velocidad de vuelo se generaron problemas en la deposición y baja uniformidad, como consecuencia de la deriva y la evaporación (Zhang et al., 2020, como se cita en Paul et al., 2024).

En una aplicación terrestre se evaluó la deposición cuantificando mediante técnicas de fluorometría el fluorescente Blankophor BA 267% usado como trazador para evaluar el efecto del tamaño de gota, volumen de aplicación y uso de coadyuvante en dos cultivares de trigo. La mayor densidad de impactos se logró con volumen de 158 L/ha, coadyuvante y gota media. Sin embargo, en uno de ellos la mayor deposición se obtuvo con gotas extremadamente gruesa. Es importante aclarar que el estrato no condicionó la deposición del trazador ni la densidad de impactos (Stoletniy, 2013).

Jastrombek et al. (2024) evaluaron la deposición de mezclas de herbicidas aplicadas con dron en comparación con mochila pulverizadora para un cultivo de maíz. La deposición del caldo fue estimada mediante espectrofotometría a partir de datos del trazador Azul Brillante en el suelo y en la parte área de *Raphanus raphanistrum* en estado de 2- 4 hojas. La aplicación con mochila determinó mayor cantidad de trazador en el suelo y sobre la maleza en todos los tratamientos. El hecho de que la deposición con dron fuera menor en el suelo sugiere un beneficio para esta aplicación, desde el punto de vista ambiental.

Por otro lado, da Cunha et al. (2024) investigaron la deposición en el dosel y las posibles pérdidas al suelo durante aplicaciones en un cultivo de café. El estudio incluyó dos tratamientos con drones, con volúmenes de 10 y 20 L/ha, y dos tratamientos con

pulverizadora hidroneumática, a 200 y 300 L/ha. Los resultados indicaron que la pulverizadora alcanzó una mayor deposición, lo cual se atribuye a la proximidad del punto de liberación respecto a las hojas y al flujo de aire dirigido generado por el ventilador. Además, se determinó que el volumen de aplicación evaluado en la pulverizadora como con el dron no tuvo un impacto significativo en la deposición.

En otra investigación se evaluó la deposición generada por un dron con boquillas con dos volúmenes diferentes (10 y 20 L/ha) en comparación con una aplicación terrestre (150 L/ha). Para la evaluación de la deposición se cuantificó la concentración generada por un trazador fluorescente sobre placas de vidrio colocadas en el campo. Una vez obtenido este valor se lo dividió sobre el área de la placa de vidrio para obtener la deposición en $\mu\text{g cm}^{-2}$. Se obtuvo una deposición significativamente mayor para el tratamiento de aplicación terrestre. En cuanto a los tratamientos con dron, en una de las 2 localidades evaluadas, el tratamiento con volumen de 20 L/ha fue superior al de 10 L/ha, mientras que en la otra no hubo diferencias significativas entre estos volúmenes (Seibt et al., 2025).

2.2.3 Eficiencia de control

Una de las principales variables que afectan la eficiencia de control sobre las malezas es el número de gotas de aspersión (Paul et al., 2024). Al aumentar el número de gotas se puede mejorar el contacto con la maleza, generando mayor nivel de control, sobre todo en formulaciones de herbicidas concentrados. Algunas investigaciones mencionan que se necesitan como mínimo 30 a 40 gotas por cm^2 en herbicidas post-emergentes para tener un alto nivel de control (Zhu et al., 2011). A su vez, si la pulverización genera desuniformidad en la deposición de gotas puede traer consigo consecuencias negativas en la efectividad del herbicida, generando mal control sobre el objetivo (Paul et al., 2024).

En un trabajo realizado en arroz se observó que el mayor control sobre malezas se obtuvo con caldos de 500 L/ha a través de una pulverizadora manual, sin diferencia significativa entre los tratamientos con dron de 30 y 45 L/ha (Paul et al., 2024).

Sobre este mismo cultivo, Jeevan et al. (2023) evaluaron la aplicación de 500 L/ha con mochila contra 15 L/ha, 20 L/ha y 25 L/ha aplicados con dron. Se observó un mayor control sobre malezas en la aplicación de 500 L/ha, sin diferencias significativas con la aplicación de 25 L/ha. Luego de transcurridos 60 días desde la aplicación dentro de los tratamientos con dron a mayor volumen mayor eficiencia de control.

Continuando con la comparación entre mochila y dron, Gubiani et al. (2024) evaluaron control y deriva. Para ello se utilizaron tamaños de gota de 100, 200 y 285 μm con volúmenes de 10, 25 y 40 L/ha respectivamente. La investigación se realizó bajo condiciones de vuelo de 3m de altura, velocidad de aplicación de 3 m/s y utilizando el herbicida sistémico Triclon (1,25 L/ha) con un coadyuvante Strides (0,5% v/v). El control y la cobertura se midieron mediante observación visual a los 7, 14 y 21 días posteriores a la aplicación. Los resultados mostraron que la aplicación con mochila alcanzó un control del 100%, mientras que aquellas con dron obtuvieron niveles de control de 95%, 90% y 78% para los volúmenes 40, 25 y 10 L/ha respectivamente.

En otro estudio realizado se evaluó el control de raigrás (*Lolium multiflorum*) y nabo (*Raphanus sativus*) según la aplicación de glifosato y glufosinato pulverizados con dron con boquillas (10 L/ha), aplicación terrestre convencional (100 L/ha) y pulverización terrestre electrostática (100 L/ha) (Palacios-Zuñiga et al., 2024). La hipótesis planteada en la investigación fue que, al reducir diez veces el volumen de aplicación mediante pulverización con drones, podría verse comprometida la eficiencia en el control de maleza debido a una menor deposición del producto. Sin embargo, los resultados mostraron que ambos herbicidas lograron un control igual o incluso superior cuando fueron aplicados con dron. En el caso del glifosato, el control fue más efectivo al aplicarse con dron tanto sobre el raigrás como sobre nabo forrajero (Palacios-Zuñiga et al., 2024). Esto puede atribuirse a que, al reducir el volumen de aplicación, cada gota contiene una mayor concentración del ingrediente activo y dado que el glifosato se transloca dentro de la planta, su eficiencia no depende de la cobertura foliar (Liu et al., 1996).

Por otro lado, se esperaba que la eficiencia del glufosinato fuera menor con la aplicación con dron, debido a su limitada capacidad de translocación (Takano et al., 2020). No obstante, como demuestran Palacios-Zuñiga et al. (2024), los resultados no mostraron diferencias significativas entre la aplicación con dron y la terrestre, lo que indica que no se perdió eficacia. Esta eficiencia podría explicarse por el flujo de aire descendente y las turbulencias generadas por los rotores del dron, los que pudieron favorecer una mejor deposición del producto, aumentando el contacto con las superficies foliares y, en consecuencia, mejorando el nivel de control.

2.2.4 Deriva

Debido a un intenso proceso de automatización al utilizar esta tecnología, algunas de las características operativas de la aplicación quedan fuera del alcance normal de quienes planifican realizar una aplicación. Esto genera una toma de decisiones diferente respecto a una pulverización convencional, donde ciertos aspectos como el espectro de gotas y el riesgo de deriva sean mucho más difíciles de gestionar directamente por el operador (Carvalho et al., 2021). En comparación con una pulverización terrestre, la aplicación con drones ahorra productos químicos, agua y tiempo. Por lo tanto, a la hora de utilizar estas aeronaves es necesario controlar la deriva y la deposición para utilizarlos de forma segura, eficaz y eficiente (Gatkal et al., 2025).

Como mencionan G. Wang et al. (2020), al hablar sobre deriva es importante conocer qué factores son los determinantes, siendo estos la velocidad del viento y el tamaño de gota. A mayor velocidad del viento y menor tamaño de gota no solo hay mayor deriva sino también la distancia a la que se encuentra el 90% de las gotas derivadas es mayor. En un estudio realizado por estos autores fue evaluado el potencial de deriva para tres tamaños de gota (100 μm , 150 μm y 200 μm) de la aplicación con dron con boquillas y bajo diferentes velocidades de viento. Las pruebas de campo mostraron que la deriva disminuyó a medida que aumentaba la distancia a favor del viento desde el borde de la franja a partir del borde de pulverización. Particularmente, la deposición a 12 metros a favor del viento disminuyó en un orden de magnitud en comparación con la deposición promedio dentro de la zona de aplicación, mientras que la deposición de casi todos los tratamientos a 50 metros a favor del viento fue inferior a los límites de detección de 0,0002 $\mu\text{L}/\text{cm}^2$. Además, se observó que la cantidad de deriva aumentaba cuánto mayor fuera la velocidad del viento y menor el tamaño de gota. En base a los resultados se concluyó que la distancia de deriva de los UAV es significativamente menor que en aviones o helicópteros agrícolas tripulados manualmente.

De forma similar a lo mencionado anteriormente, Carvalho et al. (2021) en conjunto con Agroefetiva evaluaron la dosis depositada fuera del área de pulverización a distancias de entre 4 - 64 m en relación al lugar pulverizado. Se consideró que la dosis aplicada a campo es la de referencia, es decir el 100% de la aplicación. Como era de esperar, hubo una menor deposición a mayores distancias, es decir porcentualmente cada vez menos concentración. Sin embargo, es importante destacar que siempre hubo alguna deposición, por lo que no existió ninguna distancia donde la deriva fue prácticamente nula dentro de la distancia de 64 m.

3 MATERIALES Y MÉTODOS

3.1 LOCALIZACION

Los experimentos se llevaron a cabo en la estación experimental La Estanzuela (latitud 34°20'17.06"S longitud 57°41'25.77"O), perteneciente al Instituto Nacional de Investigación Agropecuaria (INIA). Está ubicada sobre la ruta 50 en el departamento de Colonia, en la localidad de “El Semillero”.

3.2 DISEÑO EXPERIMENTAL Y TRATAMIENTOS

Se realizaron 2 experimentos, el primero fue en una pastura compuesta por *Dactylis glomerata* (denominado Experimento 1), mientras que el otro, fue sobre una *Avena sativa* (denominado Experimento 2).

En cada experimento se realizaron 4 tratamientos en franjas aleatorizadas. En el caso de las determinaciones de recuperación se consideró como unidad experimental cada placa o tarjeta que fue colocada a un intervalo constante de 2m. En las determinaciones de deposición la unidad experimental fue cada planta colectada al azar dentro de la parcela.

Para la determinación del control, la unidad experimental fue cada punto seleccionado en la transecta de la parcela, donde se categorizó el control de las plantas presentes alrededor del punto.

Los tratamientos evaluados fueron los siguientes:

- T1: Aplicación con dron con volumen 8 L/ha y gota 250 μ m
- T2: Aplicación con dron con volumen 16 L/ha y gota 250 μ m
- T3: Aplicación con dron con volumen 8 L/ha y gota 500 μ m
- T4: Aplicación con dron con volumen 16 L/ha y gota 500 μ m

El modelo de dron utilizado fue el DJI Agras T40 y durante sus aplicaciones se mantuvo fija la altura de vuelo (3m) y la velocidad de avance (18 km/h). En ambas chacras previo al comienzo de las aplicaciones se instaló una estación meteorológica (Transmisión meteorológico response ONETM Modelo 92500) a una altura de 2 metros sobre el nivel del suelo. La misma registró datos de temperatura, humedad relativa, velocidad y dirección del viento generando 8 datos por segundo.

3.3 CARACTERIZACIÓN DEL ÁREA DE CADA EXPERIMENTO

En el caso de *Dactylis glomerata*, el cultivo tenía entre 3 y 4 años de implantado, por lo que se encontraba muy macollado, con buena cobertura y biomasa. Por ende, es importante destacar que debido a su edad presentaba estructuras más lignificadas. Como consecuencia de esto y del manejo del pastoreo, se observaron restos secos acumulados en la base de las plantas.

Por otro lado, la avena se encontraba macollada, pero al tratarse de un cultivo anual, presentaba menor grado de lignificación. A su vez, la avena es considerada una gramínea suculenta debido al alto contenido de agua en sus tejidos, por lo que en rasgos generales se encontraba más susceptible que el *Dactylis*.

3.4 METODOLOGÍA DE INSTALACIÓN

En las Figuras 1 y 2 se puede observar las dimensiones de la parcela de cada tratamiento, las que fueron de 50 m por 20 m, y entre ellas se mantuvo una distancia mínima de 20 m. Esta separación tuvo como objetivo evitar la posible deriva entre los tratamientos. La disposición de las parcelas en la chacra estuvo directamente relacionada con la dirección del viento, ya que para una correcta aplicación se considera que la dirección del viento debe ser perpendicular a la dirección de vuelo del dron (50 m).

Figura 1

Croquis del diseño experimental, dirección del viento y del vuelo del experimento 1

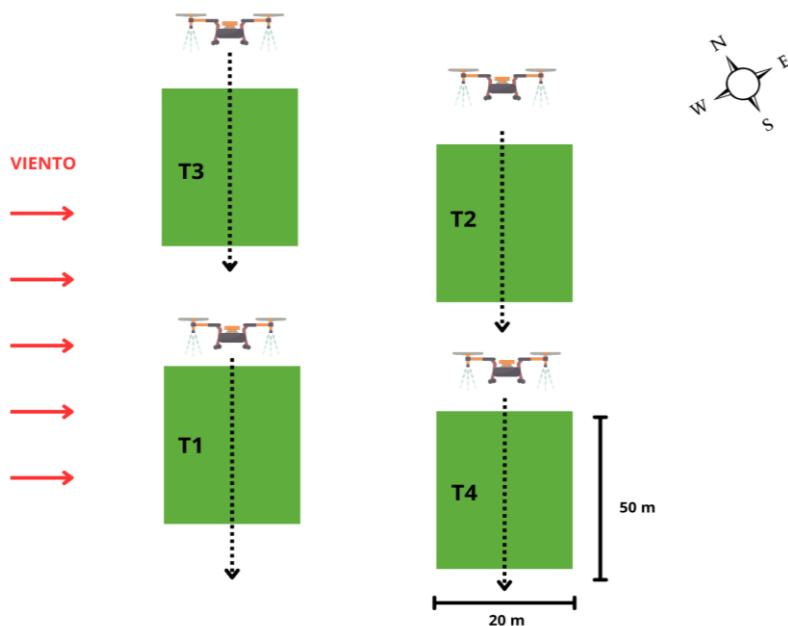
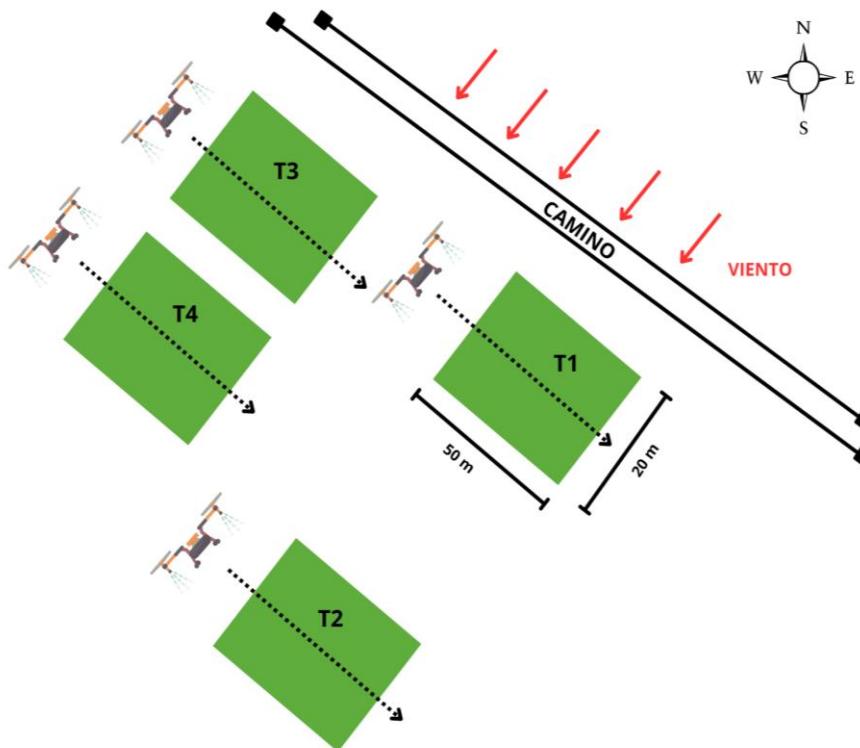


Figura 2

Croquis del diseño experimental, dirección del viento y del vuelo del experimento 2



3.5 PREPARACIÓN DEL CALDO

Respecto a la preparación del caldo para las aplicaciones con dron, pese a las variaciones en los tratamientos ya mencionados, la dosis del producto fue siempre la misma y lo que varió fue la cantidad de agua utilizada. El herbicida utilizado fue glufosinato de amonio (Lifeline) a una dosis de 2 L de producto comercial/ha, siendo el mismo un herbicida de contacto. Además, se incluyó sulfato de amonio al 2% y el coadyuvante Ako Punch a una dosis de 100 mL/100 L agua. Al usar agua conocida como agua dura por presencia de cationes calcio y magnesio, se agregó sulfamonio como corrector. El producto comercial, GrowSRAY Sulfamonio, se aplicó en una proporción de 4% del volumen total del caldo.

Sumado a los ingredientes mencionados anteriormente se incluyó Tinopal a 5 g/L, el cual es un trazador fluorescente. La utilización de este producto tuvo como objetivo estimar la recuperación en placas de Petri y la deposición en plantas. Para ello se cuantificó la concentración del mismo usando un espectrofluorímetro (marca Shimadzu, modelo RF-6000) a longitud de onda de excitación de 350 nm y 400 nm de emisión.

3.6 DETERMINACIONES

3.6.1 Tasa de recuperación

En primer lugar, se determinó la tasa de recuperación, la cual se define como la proporción del producto aplicado que efectivamente se recupera o detecta en un determinado lugar o superficie, siendo un indicador clave para evaluar la eficiencia de la aplicación. La unidad experimental utilizada para evaluarla fueron tarjetas hidrosensibles y placas de Petri, donde se colectó el caldo para la determinación analítica de Tinopal.

Fueron colocadas 10 tarjetas hidrosensibles y 10 placas de petri por tratamiento a un intervalo constante de 2m a lo ancho de la parcela. Posterior a la aplicación las mismas fueron recogidas y llevadas al laboratorio para su evaluación.

En cuanto a las tarjetas, estas no pudieron ser evaluadas mediante la aplicación “Cuthill Hydroreader Planner” debido al alto porcentaje de humedad ambiente que deterioró las tarjetas. Por ende, se optó por realizar un conteo manual utilizando un cuadro de 1cm x 1cm y colocando el mismo de forma aleatoria 3 veces dentro de cada una de las tarjetas. Esto permitió obtener 3 datos de gotas/cm² en cada tarjeta y en base a estos un promedio por tarjeta. Además, tomando en cuenta todas las tarjetas de cada tratamiento se calculó un promedio por tratamiento.

Considerando los promedios por tratamiento y utilizando la siguiente fórmula: $Q [l / Ha] = (\pi * k) / (60 * (100 / \phi)^3)$ se calculó el volumen aproximado que impactó promedialmente sobre cada uno de los tratamientos, siendo k la cantidad de impactos/cm², mientras que ϕ el diámetro de gota. Una vez obtenido este valor, se lo contrastó con el volumen total aplicado por tratamiento y se obtuvo un porcentaje de recuperación ($Q (L / ha) / \text{Tasa de aplicación del experimento}$).

En cuanto al tamaño de gota, el mismo no pudo ser calculado mediante la aplicación, por lo que se tomo en cuenta información generada por Agroefetiva para un dron DJI Agras T40 (Antuniassi et al., 2025). Esta información permite considerar el valor real de las gotas ya que es un método muy preciso. El tamaño de gota, diámetro volumétrico mediano (DVM) se obtuvo a partir de la medición de la gota real generada por el dron, al someterlo al rayo de luz laser en prueba en el túnel de viento de alta velocidad. Para la gota de 500 μ m generada con ciertas rpm del rotor, se observó que el tamaño real de la misma fue 289 μ m, siendo una gota media. Por otro lado, para la gota de 250 μ m, su tamaño real fue de 132 μ m, siendo una gota fina (Antuniassi et al., 2025).

Respecto a las placas, se cuantificó la cantidad de trazador que llegó y en base a lo que debería haber llegado, teóricamente según lo que se cuantificó en el caldo y para esa superficie, se estimó un porcentaje de recuperación. Para esto, cada una de las muestras fue lavada con 20 mL de agua destilada en el laboratorio para desprender el Tinopal de la superficie de la placa.

Posteriormente, las muestras fueron analizadas en un espectrofluorímetro, el cual midió mediante un programa los μg tinopal en cada una de las muestras de placa. Esta herramienta estimula el tinopal con una luz ultravioleta a 350 nm, generando una excitación de las partículas. Una vez excitadas, estas liberan energía en forma de luz con una longitud de 400 nm, lo cual es medido por el equipo. Para que el programa pudiera calcular con precisión la cantidad de Tinopal, se ajustó una curva de calibración. Para generarla se utilizaron concentraciones conocidas, de forma tal que al medir la muestra sus valores se ubicaran dentro del rango de la curva, permitiendo así determinar con exactitud la concentración de Tinopal.

De la misma forma que se midió la concentración de Tinopal con el espectrofluorímetro para cada una de las placas, también se estimó para los diferentes caldos evaluados. Al obtener este valor se realizaron una serie de cálculos que permitieron llegar a los $\mu\text{g/L}$ de tinopal en cada uno de los caldos y al multiplicarlo por el volumen total específico de cada tratamiento, a la cantidad de tinopal total en el caldo aplicado. Luego, considerando un diámetro de placa de 9,8 cm se calculó el área de la misma con el objetivo de estimar cuánto del total previamente estimado debería haber llegado a la superficie de la placa. Una vez generado el valor esperable de recuperación por placa, se lo contrastó con el valor que realmente se midió en cada una de ellas, obteniendo un porcentaje recuperado del total por placa. Tomando en cuenta las 10 placas por tratamiento se obtuvo un valor promedio, siendo este el porcentaje de recuperación que será analizado.

3.6.2 Deposición

Luego de realizar las aplicaciones se evaluó la deposición en planta mediante la cuantificación de cantidad de trazador en plantas objetivo. Para ello se recogieron 60 macollos por tratamiento de forma aleatoria.

Las muestras de planta también fueron lavadas con 20 mL de agua destilada para extraer el Tinopal de las mismas y luego medir su concentración. Posteriormente las

plantas fueron colocadas en bolsas de papel para ser secadas en una estufa a 60º C por 48 h y ser posteriormente pesadas. El pesaje se hizo para poder expresar los μg tinopal estimados por el espectrofluorímetro por gramo de materia seca para cada una de las muestras de planta. Este es el indicador utilizado para evaluar la deposición en cada uno de los tratamientos.

3.6.3 Eficiencia de control

Como tercera variable de evaluación se incluyó el nivel de control ejercido por el herbicida sobre las plantas objetivo. Posterior a la aplicación en ambas chacras se cuantificó la proporción material senescente y determinó el porcentaje de control de cada tratamiento sobre la pastura. Se determinaron 30 puntos de muestreo por tratamiento, en los cuales se asignó un cierto porcentaje de control visual y siempre tomando en cuenta aquella zona controlada por la aplicación, es decir ignorando corredores en los que no fue efectiva la aplicación.

Es relevante mencionar que en el Experimento 1 (*Dactylis glomerata*) se hicieron 3 evaluaciones de control, mientras que en la Experimento 2 (*Avena sativa*) por motivos ajenos a la investigación solamente dos. Ambas chacras coincidieron con la fecha de la primera y segunda evaluación de control, siendo las mismas el 21/4 (10 días post aplicación-DPA) y el 28/4 (17 DPA). Como en el experimento 1 se observó una evolución de la primera evaluación a la segunda se optó por realizar un tercer control, el cual se llevó a cabo el 8/5 (27 DPA).

A su vez, para evaluar el control se utilizó un dron multiespectral que permite medir el Índice de Vegetación de Diferencia Normalizada (NDVI). Este índice permitió monitorear la evolución de la vegetación y la cobertura sobre el suelo. En el Experimento 1, las mediciones de NDVI se efectuaron en dos momentos: el día de la aplicación (0 DPA) y a los 10 días posteriores (10 DPA). Mientras que en el experimento 2 la evaluación se realizó únicamente a los 10 DPA, por lo que se estableció una comparación entre los valores de los tratamientos y sus respectivos testigos. Para estos últimos, se determinaron parcelas equivalentes a las de cada tratamiento en una zona de la chacra no aplicada, con el propósito de cuantificar el contraste entre ambas condiciones.

Los valores de NDVI oscilan entre -1 y 1, en donde valores inferiores a 0,1 indican presencia de suelo desnudo o cuerpos de agua. Por otro lado, valores mayores reflejan una mayor cobertura vegetal, asociada a una mayor actividad fotosintética. El cálculo del

NDVI se basa en la reflectancia registrada en la banda del infrarrojo cercano y en la banda del rojo (Olivares & López-Beltrán, 2019).

3.7 ANÁLISIS ESTADÍSTICO

La recuperación en las placas fue analizada a través del procedimiento GLIMMIX del paquete estadístico SAS. Se asumió una distribución Beta, la cual permite el análisis de muestras de deposición expresadas en porcentaje de una muestra conocida, también usada para peso/peso o volumen/volumen. En los casos donde el modelo indicó diferencias significativas, se realizó la separación de medias usando Tukey al 0.05 o al 0.10.

En cuanto al análisis de plantas, el mismo se realizó a través del procedimiento GLINMIX del paquete estadístico SAS, asumiendo una distribución Gamma. Se optó por la misma al analizar que se contaba con una mayor cantidad de datos con valores chicos y pocos con valores grandes. En los casos donde el modelo indicó diferencias significativas, se realizó la separación de medias usando Tukey al 0.05 o al 0.10.

Por otro lado, el análisis de control se realizó a través del Modelo Lineal Generalizado, asumiendo una distribución Multinomial Ordinal de la variable % de control. Para ello, los valores de porcentaje de control fueron agrupados en una escala, donde de 0- 60% el control se consideró Insuficiente; 61 a 70% = suficiente; 71 a 80% = Bueno; 81 a 90% = Muy Bueno y de 91 a 100 = Excelente.

3.8 CONDICIONES METEOROLÓGICAS DURANTE LA APLICACIÓN

En base a la información generada por la estación meteorológica se caracterizaron ciertas variables fundamentales que tienen un efecto muy importante sobre los resultados observados. Estas variables son humedad relativa, temperatura y velocidad del viento, donde en las aplicaciones con dron se recomiendan las siguientes condiciones: humedad relativa superior al 50%, temperatura ambiente inferior a 30°C y velocidad media del viento entre 3-10 km/h (Antuniassi et al., 2025). La variable que tiene un mayor impacto en los factores evaluados es el viento, ya que incide notoriamente en la trayectoria de la gota y por lo tanto en el destino de la misma.

En las Tablas 1 y 2 se presentan las condiciones meteorológicas ocurridas durante las aplicaciones en ambos experimentos.

Tabla 1*Condiciones meteorológicas promedio durante el experimento 1*

Tratamiento	Rango de tiempo	Viento (km/h)	HR (%)	Temp (°C)
1	9:34:52 a 9:35:17	10.7	82.6	20.5
2	10:30:05 a 10:30:32	17.7	76.2	20.8
3	9:44:42 a 9:45:07	13.8	91	21
4	10:18:45 a 10:19:11	13.1	92.6	20.6

Nota. T1: volumen 8 L/ha y gota 250μm; T2: volumen 16 L/ha y gota 250μm; T3: volumen 8 L/ha y gota 500μm; T4: volumen 16 L/ha y gota 500μm.

Tabla 2*Condiciones meteorológicas promedio durante el experimento 2*

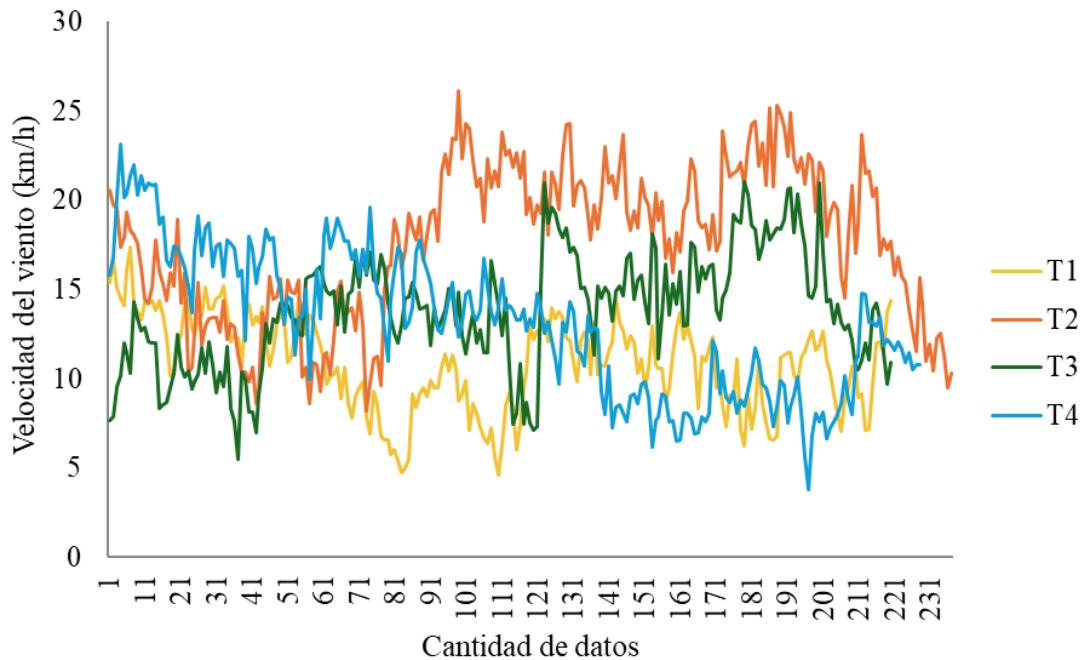
Tratamiento	Rango de tiempo	Viento (km/h)	HR (%)	Temp (°C)
1	9:20:29 a 9:20:54	13.9	65.4	21.2
2	9:38:46 a 9:39:10	14.3	74.4	21.3
3	9:13:22 a 9:13:38	13.8	61.6	20.8
4	9:44:43 a 9:45:08	14.9	72.4	21.1

Nota. T1: volumen 8 L/ha y gota 250μm; T2: volumen 16 L/ha y gota 250μm; T3: volumen 8 L/ha y gota 500μm; T4: volumen 16 L/ha y gota 500μm.

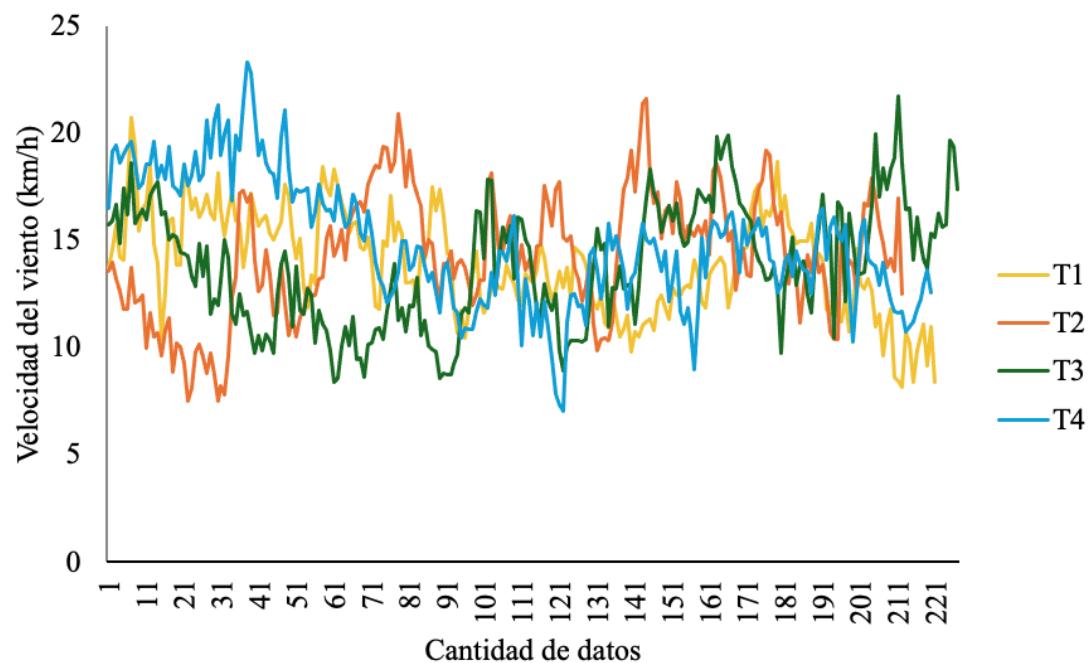
Respecto a la humedad relativa y temperatura todos los valores se encuentran dentro de la franja recomendada para realizar la aplicación a excepción de algunos que serán mencionados a continuación. Para el caso del experimento 1, el tratamiento 3 y 4 se realizaron con condiciones de humedad relativa algo elevadas, estando dentro del rango de condiciones marginales. Al haber mayor humedad hay mayor rocío, por lo que la gota tiene una mayor vida media y aumenta la probabilidad de que escurra sobre la hoja terminando fuera del objetivo (Agriculture Victoria, 2022). Sin embargo, se considera que para la hora en la que se realizaron los experimentos el rocío no fue un problema.

Como se puede observar, hay una importante variación en las velocidades del viento promedio por tratamiento pese a haber poco tiempo entre aplicaciones. A modo de ejemplo, entre los vuelos realizados para el tratamiento 1 y 2 de la chacra 1 hay tan solo una hora de diferencia aproximadamente y la diferencia de velocidad entre ambos es de 7 km/h. A su vez, al subir a valores de 17.7 km/h ya se estaría en el rango en el que sería riesgoso aplicar por mayor riesgo de deriva (> 16 km/h). Esto demuestra la gran variabilidad temporal de este factor, el cual puede incidir significativamente en la eficiencia de la aplicación. Por lo tanto, al ser un factor no controlado por el aplicador se deben tener precauciones al momento de planificar el momento de la aplicación.

Dado el rol fundamental que desempeña el viento en las aplicaciones, se consideró relevante evaluar además de la variabilidad entre tratamientos, aquella ocurrida en el correr de cada aplicación. Con esta información se construyeron las Figuras 3 y 4, en donde se observa la gran variabilidad en la velocidad del viento en los pocos segundos en los que ocurrió la aplicación. En el eje X del mismo, se representa la cantidad de datos registrados durante la totalidad de cada tratamiento, siendo 8 datos por segundo.

Figura 3*Evolución del viento durante el experimento 1*

Nota. T1: volumen 8 L/ha y gota 250 μ m; T2: volumen 16 L/ha y gota 250 μ m; T3: volumen 8 L/ha y gota 500 μ m; T4: volumen 16 L/ha y gota 500 μ m.

Figura 4*Evolución del viento durante el experimento 2*

Nota. T1: volumen 8 L/ha y gota 250 μ m; T2: volumen 16 L/ha y gota 250 μ m; T3: volumen 8 L/ha y gota 500 μ m; T4: volumen 16 L/ha y gota 500 μ m.

Es fundamental destacar que el promedio de la velocidad del viento es un factor que enmascara la realidad, ya que las fluctuaciones pueden ser muy significativas en cortos periodos de tiempo. Por ejemplo, al observar el tratamiento 4 de la Figura 3, se destaca que al comienzo de la aplicación la velocidad del viento rondaba los 23 km/h, mientras que en pocos segundos disminuyó hasta valores menores a 5 km/h.

4 RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Los resultados se presentan para cada variable evaluada para los 2 experimentos, si bien cada experimento tuvo sus singularidades en relación a la especie a controlar y a las condiciones meteorológicas, los tratamientos fueron los mismos. Las particularidades de cada caso se analizan al presentarlos.

4.1 TASA DE RECUPERACIÓN

4.1.1 Tarjetas hidrosensibles

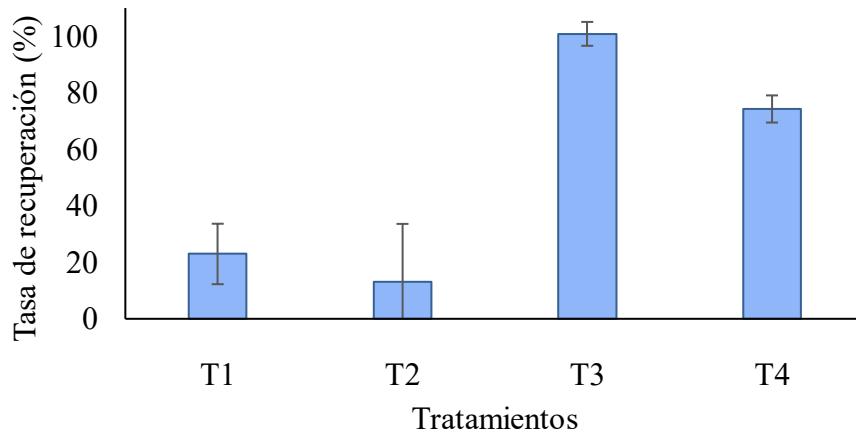
En primer lugar, es importante destacar que los resultados presentados corresponden a una estimación de la tasa de recuperación. Para su cálculo se consideraron ciertos supuestos, los cuales podrían explicar que en algunos casos los valores superen 100%. Esto no es esperable, dado que no debería recuperarse más producto del efectivamente aplicado. Las principales causas de esa sobreestimación podrían deberse a un error humano en el conteo visual de gotas y a que el tamaño (DMV) de las mismas se tomó de referencia bibliográfica en lugar de ser medido directamente en estos experimentos.

De igual manera, en los resultados se evidenciaron ciertas tendencias. Se puede inferir un efecto más marcado del tamaño de gota en comparación con el volumen de aplicación, donde a mayor tamaño de gota mayor es la tasa de recuperación. No obstante, se aprecia una leve tendencia de que, a un mismo tamaño de gota, con volúmenes de aplicación más altos la tasa de recuperación disminuye. Si bien se esperaría que un mayor volumen de aplicación generase una recuperación igual o superior a la de un menor volumen, esto no ocurrió, debido a que el número de impactos de gotas fue similar o levemente mayor que en los tratamientos de menor volumen (Tabla 3). Esta similitud de impactos en el experimento coincide con lo reportado por diversos autores, donde no hubo diferencia significativa en la cantidad de impactos generados por dron utilizando volúmenes de 30 L/ha y 45 L/ha (Paul et al., 2024).

A su vez, respecto al número de impactos (Tabla 3) los mismos se encuentran por debajo del rango recomendado de 30-40 impactos/cm² para un herbicida post-emergente de contacto con es el glufosinato de amonio (Zhu et al., 2011). Esta cantidad de impactos es la necesaria para en la teoría alcanzar un alto nivel de control, lo cual será posteriormente analizado.

Figura 5

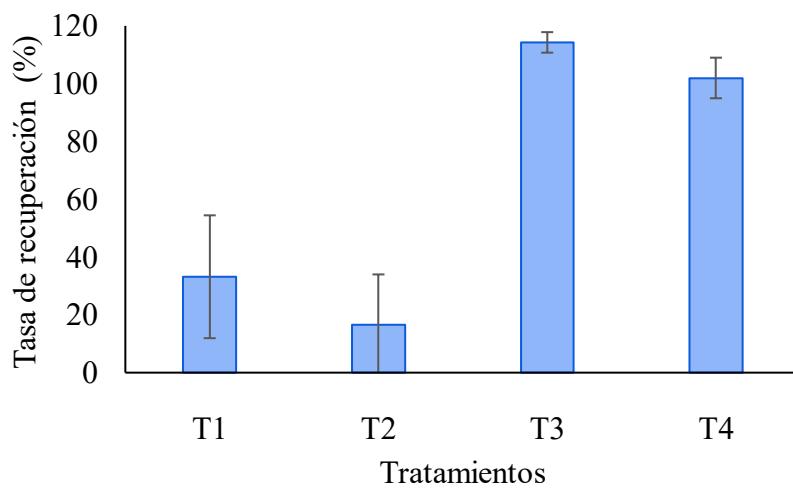
Recuperación sobre tarjetas hidrosensibles en el experimento 1



Nota. T1: volumen 8 L/ha y gota 250 μ m; T2: volumen 16 L/ha y gota 250 μ m; T3: volumen 8 L/ha y gota 500 μ m; T4: volumen 16 L/ha y gota 500 μ m.

Figura 6

Recuperación sobre tarjetas hidrosensibles en el experimento 2



Nota. T1: volumen 8 L/ha y gota 250 μ m; T2: volumen 16 L/ha y gota 250 μ m; T3: volumen 8 L/ha y gota 500 μ m; T4: volumen 16 L/ha y gota 500 μ m.

El tamaño de gota se presenta como el factor determinante, ya que un mayor diámetro implica una menor proporción de gotas potencialmente derivable y en consecuencia una mayor llegada del producto al área objetivo. Considerando además las

condiciones climáticas durante la aplicación, resulta coherente que los tratamientos con gotas de menor tamaño registraron una menor tasa de recuperación.

Tabla 3

Número de impactos/cm² registrados en ambos experimentos

	Promedio impactos/cm²	
	Experimento 1	Experimento 2
8 L/ha - 250µm	15	22
16 L/ha - 250µm	18	22
8 L/ha - 500µm	6	7
16 L/ha - 500µm	9	13

4.1.2 Placas de Petri

En primer lugar, es importante destacar que para el análisis de tasa de recuperación en placas no se consideraron aquellas en las que la medición de Tinopal resultó igual a cero, que pudo ser consecuencia de la ubicación respecto a la superposición de pasadas, a una racha de viento puntual o al nivel de detección del trazador. Con esto se buscó evitar que dichos valores afectaran el promedio por tratamiento, construyéndose éste únicamente a partir de las placas en las que fue posible estimar la recuperación de lo esperado. El análisis estadístico indica la inexistencia de interacción entre volumen de aplicación y tamaño de gota en la recuperación en las placas de Petri (Tabla 4). Solo hubo efecto del tamaño de gota.

Tabla 4

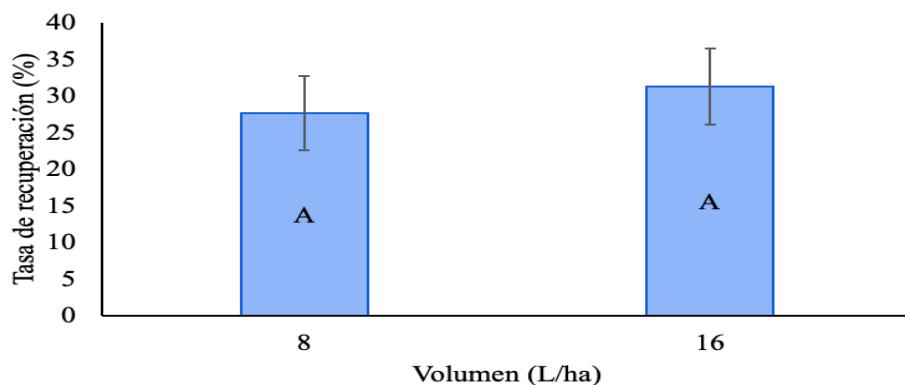
Significancia estadística de los factores y su interacción en las placas de experimentos 1 y 2

Factor	P-valor	
	Experimento 1	Experimento 2
Volumen	0.6174	0.2347
Tamaño de gota	0.0743	0.0021
Volumen x Tamaño de gota	0.3975	0.5015

En ambos experimentos se puede resaltar que en rasgos generales se observa un bajo porcentaje de recuperación. En el mejor de los casos un 36,6% del Tinopal fue detectado en las placas, lo cual estaría mostrando que poco más de un tercio del producto está alcanzando el objetivo.

Figura 7

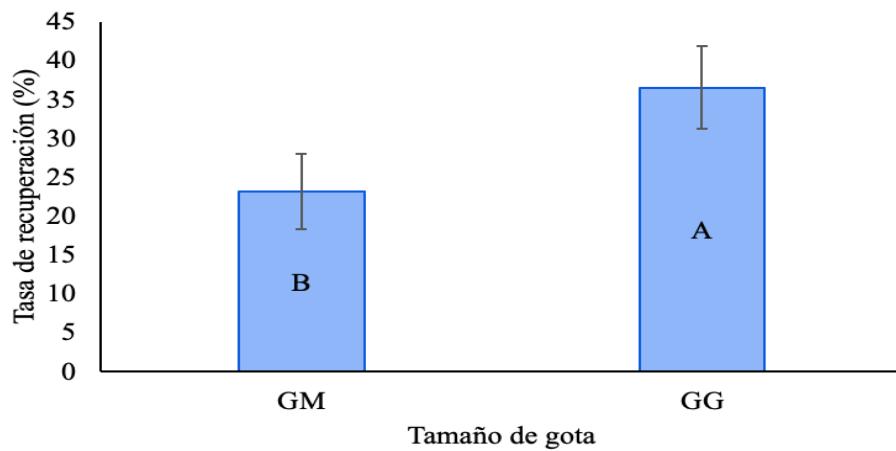
Efecto del volumen de aplicación en la recuperación en el experimento 1



Nota. Medias con letra común no son significativamente diferentes ($p \geq 0,10$).

Figura 8

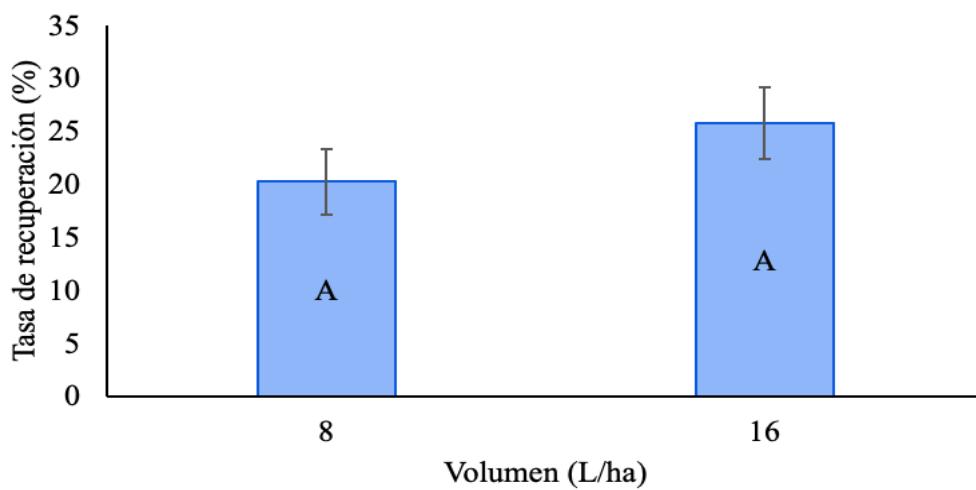
Efecto del tamaño de gota en la recuperación en el experimento 1



Nota. Medias con una letra común no son significativamente diferentes ($p \geq 0,10$). GM= 250 μ m; GG= 500 μ m.

Figura 9

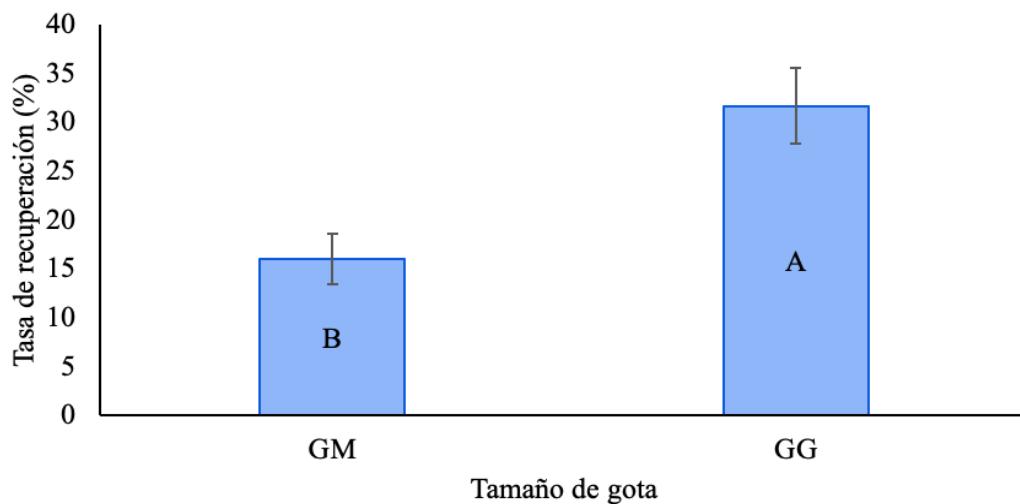
Efecto del volumen en la recuperación en el experimento 2



Nota. Medias con una letra común no son significativamente diferentes ($p \geq 0,10$).

Figura 10

Efecto del tamaño de gota en la recuperación en el experimento 2



Nota. Medias con una letra común no son significativamente diferentes ($p \geq 0,05$). GM= 250 μ m; GG= 500 μ m.

El tamaño de gota grande (500 μ m) generó una mayor recuperación que la gota media (250 μ m) (Figura 8 y 10). La explicación de esto puede delinearse en que al utilizar una gota media, implica una mayor proporción de gotas inferiores a 200 μ m, las cuales son más susceptibles a la deriva. En ambas chacras al utilizar gota gruesa se obtuvo valores superiores de recuperación, asociados a un mayor DVM y por ende a una menor proporción de gotas potencialmente derivables.

Respecto al factor volumen de aplicación (Figuras 7 y 9), no determinó diferencias estadísticas en la tasa de recuperación. Sin embargo, en ambos experimentos se muestra cierta tendencia a una mayor recuperación con el volumen más alto (16 L/ha). Esto podría deberse a que el mayor volumen determina mayor probabilidad de que el producto llegue al objetivo.

4.2 DEPOSICIÓN

En lo que respecta a la deposición se midió la cantidad de trazador por gramo de materia seca de las plantas objetivo. Para realizar los cálculos se tomó únicamente las muestras a las que llegó el Tinopal, esto se debe a que al momento de la recolección se tomaron criterios diferentes en cada experimento. En el experimento 1 se tomaron muestras de toda el área tratada, incluyendo el borde, y en el experimento 2 se tomaron muestras únicamente por donde pasó el dron. Para que el método de recolección no

incidiera en los resultados se decidió descartar las muestras sin presencia de producto por estar al borde del área aplicada.

Al realizar el análisis estadístico se comprobó la significancia de la interacción entre los factores tamaño de gota y volumen (Tabla 5). Por lo tanto, se evaluaron todas las interacciones posibles de las variables estudiadas.

Tabla 5

Significancia estadística de los factores y su interacción en las plantas del experimento

1

Factor	P-valor
Volumen	< 0.0001
Tamaño de gota	0.2780
Volumen x Tamaño de gota	0.0185

Como se destaca en la Tabla 6, el contar con tamaño de gota grueso o volumen de 16 L/ha generó una mayor deposición en planta, independientemente de la otra variable estudiada. En caso de utilizar gota media se necesitó un volumen de 16 L/ha para lograr una mayor deposición, mientras que si se utiliza un volumen bajo (8 L/ha), se requiere un mayor tamaño de gota para generar el mismo efecto. Como fue mencionado anteriormente en la recuperación en placas, el utilizar un tamaño de gota más pequeño genera que exista una mayor cantidad de gotas potencialmente derivables, lo cual explica en este caso la menor deposición. El mantener este tamaño de gota, pero incrementar el volumen llevó a que exista una mayor probabilidad de que el producto llegue al objetivo, en este caso se ve reflejado en el incremento en la deposición.

Tabla 6

Deposición (μg Tinopal/g MS) en el experimento 1 analizando la interacción entre factores

Tratamientos	8 (L/ha)	16 (L/ha)
GM	1.11 (± 0.25) Bb	6.36 (± 1.22) Aa
GG	2.71 (± 1.04) Aa	4.57 (± 0.74) Aa

Nota. Medias con una letra común no son significativamente diferentes ($p \geq 0,05$). Letras mayúsculas corresponden a la significancia dentro de volúmenes. Letras minúsculas corresponden a la significancia dentro de tamaño de gota. GM= 250μm; GG= 500μm.

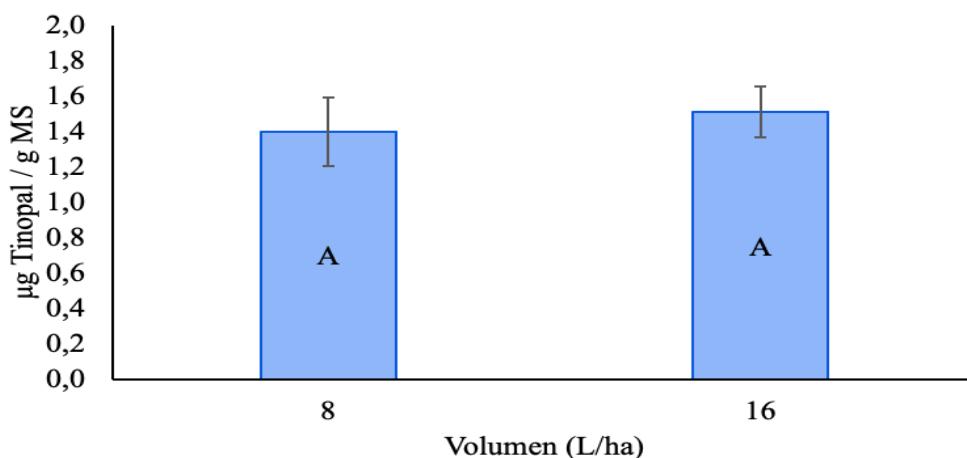
Tabla 7

Significancia estadística de los factores y su interacción en las plantas del experimento 2

Factor	P-valor
Volumen	0.6582
Tamaño de gota	0.3963
Volumen x Tamaño de gota	0.5526

Figura 11

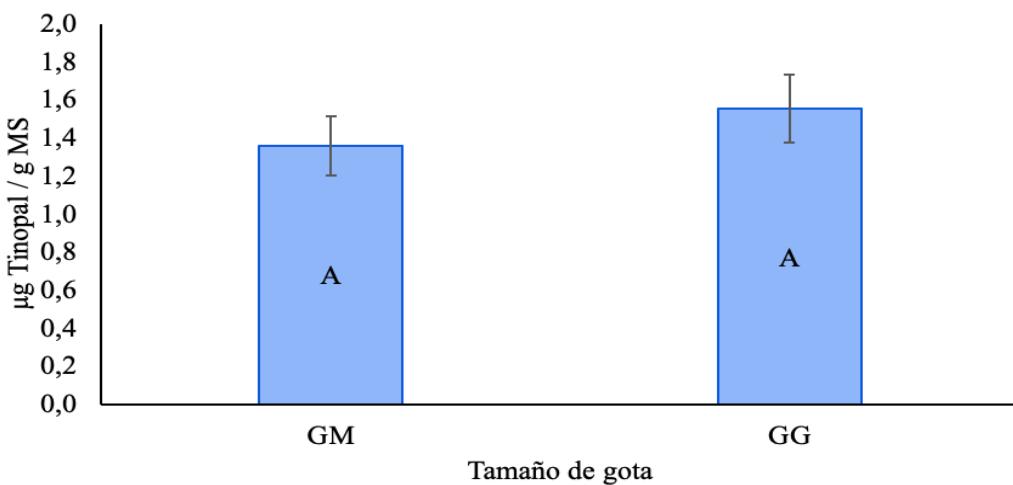
Deposición en plantas en el experimento 2 al analizar el factor principal volumen



Nota. Medias con una letra común no son significativamente diferentes ($p \geq 0,10$).

Figura 12

Deposición en plantas en el experimento 2 al analizar el factor principal tamaño de gota



Nota. Medias con una letra común no son significativamente diferentes ($p \geq 0,10$). GM= 250µm; GG= 500µm.

Por otro lado, en el experimento 2, no se encontraron diferencias significativas ni en los factores evaluados ni en la interacción entre ellos (Tabla 7). De forma similar a lo reportado por Seibt et al. (2025), en el experimento 1 se detectaron diferencias significativas entre los volúmenes de aplicación, observándose una mayor deposición a medida que aumentaba el volumen. En cambio, en el experimento 2 esta relación no se

evidenció. No obstante, puede apreciarse una tendencia general a que volúmenes y tamaños de gota mayores se asociaron a una mayor deposición (Figura 11 y 12). En cualquier caso, las diferencias entre los volúmenes de aplicación no resultaron estadísticamente significativas, lo cual coincide con lo señalado por da Cunha et al. (2024).

4.3 CONTROL

El control por apreciación visual de daño se realizó en varias evaluaciones, de forma de ver la evolución, por eso los datos se presentan por separados para cada experimento, de forma de simplificar el análisis.

4.3.1 Experimento 1

En este experimento el análisis detectó interacción de los factores de estudio en la evaluación a los 10 y a los 27 DPA. A los 10 DPA (Figura 13) aún existe una alta probabilidad (alrededor del 50%) de obtener un control insuficiente (< 60% control) y apenas suficiente (61 a 70 % de control) cuando se aplican volúmenes bajos (8 L/ha). Este perfil de control no se obtuvo en los tratamientos de 16 L/ha. En el volumen de 8 L no hubo diferencias en el perfil de distribución independientemente del tamaño de gota. Mientras que, en el volumen de 16 L, la interacción con el tamaño de gota es bien contundente (Figura 14).

Esto se puede apreciar claramente en las medias ponderada de control (Tabla 9), donde se aprecie que el volumen de aplicación tuvo una influencia más marcada sobre el nivel de control que el tamaño de gota, donde ambos tratamientos con volumen de 16 L/ha tienen una media significativamente mayor. Particularmente al utilizar este volumen y una gota gruesa hay aproximadamente un 80% de probabilidad de que el control sea muy bueno (81-90%) y excelente (91-100%) (Figura 14).

A su vez, se destaca que con un volumen de 8 L/ha no se observan diferencias significativas entre la aplicación con gota media y gota gruesa. En cambio, al aumentar el volumen a 16 L/ha, el utilizar gota gruesa (500 μ m) presenta un control significativamente superior al obtenido con gota media (250 μ m).

Tabla 8

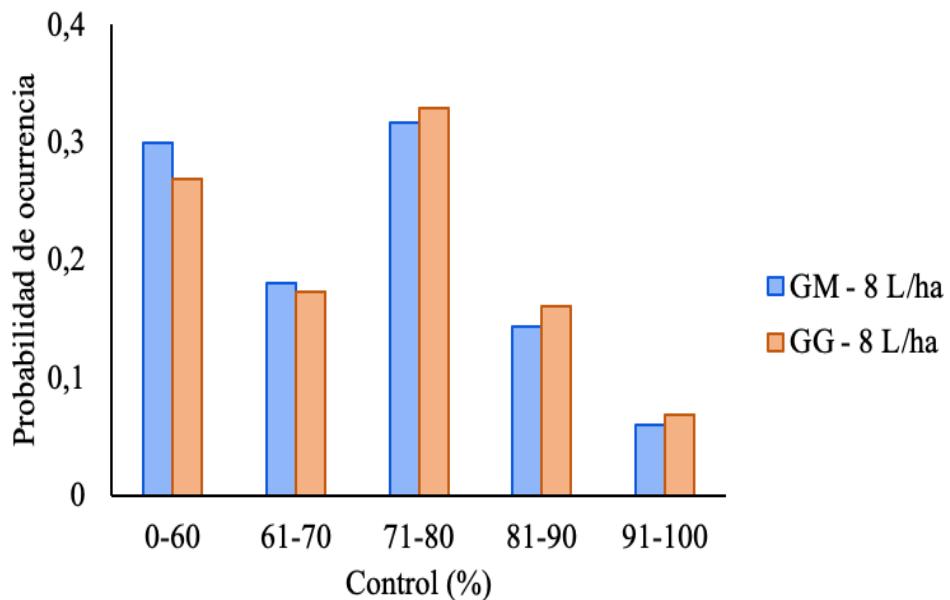
Significancia estadística de los factores y su interacción (p-valor) en el control

Factor	10 DPA	17 DPA	27 DPA
Volumen	< 0.0001	< 0.0001	< 0.0001
Tamaño de gota	0.0007	0.0047	0.0006
Volumen x Tamaño de gota*	0.0026	0.8731	0.0430
TG G vs M: Vol 8	0.7428		< 0.0001
TG G vs M: Vol 16	< 0.0001		0.3681
Vol 8 vs 16: GM	0.0482		< 0.0001
Vol 8 vs 16: GG	< 0.0001		0.0105

Nota. Valores dentro del cuadro refieren al p-valor. *Al existir significancia entre factores se desglosan estadísticamente sus componentes.

Figura 13

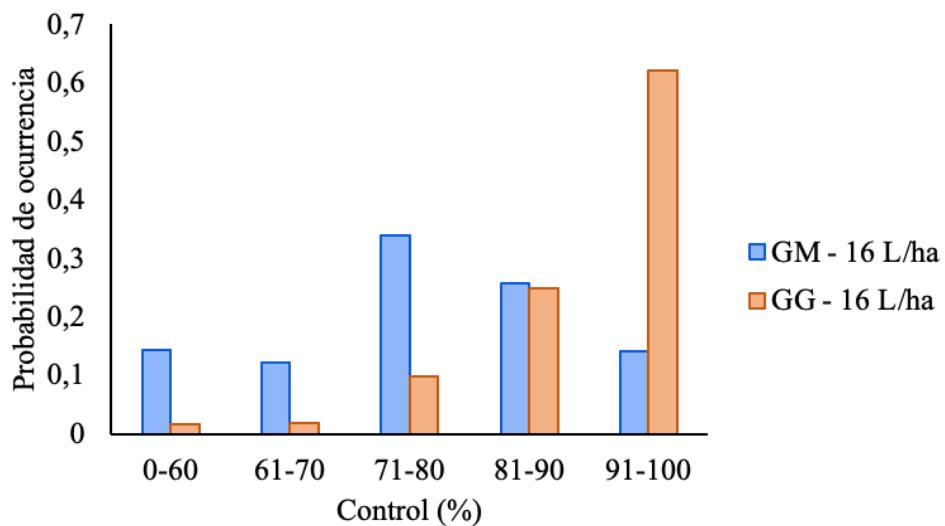
Probabilidad de ocurrencia para la escala de control tratamientos 8 L/ha variando TG (10 DPA)



Nota. TG = tamaño de gota; GM= 250μm; GG= 500μm.

Figura 14

Probabilidad de ocurrencia para la escala de control tratamientos 16 L/ha variando TG (10 DPA)



Nota. TG = tamaño de gota; GM= 250μm; GG= 500μm.

Tabla 9*Media ponderada (% control) de cada interacción a los 10 DPA*

	8 L/ha	16 L/ha
GM	62 Ab	73 Ba
GG	64 Ab	89 Aa

Nota. Medias con una letra común no son significativamente diferentes ($p \geq 0,05$). Letras mayúsculas corresponden a la significancia dentro de volúmenes. Letras minúsculas corresponden a la significancia dentro de tamaño de gota. GM= 250 μ m; GG= 500 μ m.

Considerando que el herbicida utilizado es glufosinato de amonio es importante contemplar las condiciones climáticas posteriores a la aplicación, ya que las mismas pueden afectar la acción del producto. Este herbicida requiere un periodo de 6 horas con ausencia de precipitaciones luego de la aplicación. A su vez, la velocidad de aparición de los síntomas depende principalmente de luz solar intensa, alta humedad y suelo húmedo (Shaner et al., 2014). Como ya fue mencionado, el control fue bajo particularmente a los 10 DPA en este experimento y tuvo un considerable aumento con el pasar de los días. Es probable que esto se haya debido a que los días próximos a la aplicación fueron muy nublados, lo cual impidió que la acumulación tóxica de amonio producto de la inhibición de la glutamina sintetasa causada por el glufosinato, no interaccionara con los procesos fotosintéticos. Esta menor interacción podría haber reducido la inhibición sobre dichos procesos, provocando así un control menos efectivo (Lewis et al., 2016).

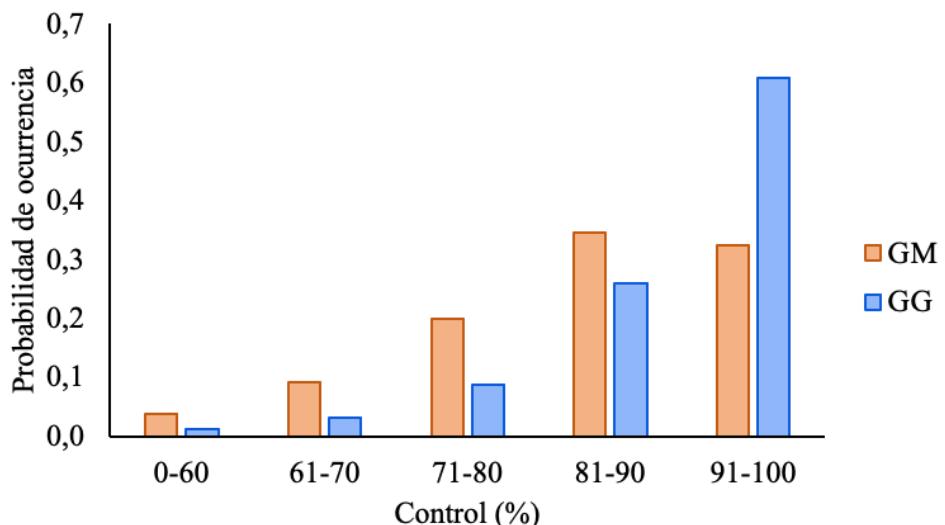
Según los resultados presentados en la Tabla 8, a los 17 DPA no se encontró interacción entre el tamaño de gota y la tasa de aplicación. Por este motivo, ambos factores se evaluaron de forma independiente. En este análisis, ambos factores principales mostraron diferencia significativa.

Es importante destacar la evolución del nivel de control que se obtuvo para los diferentes tratamientos, así se puede apreciar en el perfil de escala de control (Figuras 15 y 16), se aprecia una menor probabilidad de controles insuficientes y suficientes. Esto también se ve reflejado en un incremento de las medias ponderadas (Tabla 10). En concordancia con lo observado a los 10 DPA, a los 17 DPA el volumen de aplicación

tuvo un efecto más relevante que el tamaño de gota, registrando un mayor nivel de control con el volumen más alto (16 L/ha). No obstante, también debe considerarse el efecto del tamaño de gota, ya que un mayor tamaño (500 μ m) se asoció con un incremento significativo en el nivel de control.

Figura 15

Probabilidad de ocurrencia para la escala de control analizando factor TG (17 DPA)



Nota.

GM= 250 μ m; GG= 500 μ m.

Figura 16

Probabilidad de ocurrencia para la escala de control analizando factor volumen (17 DPA)

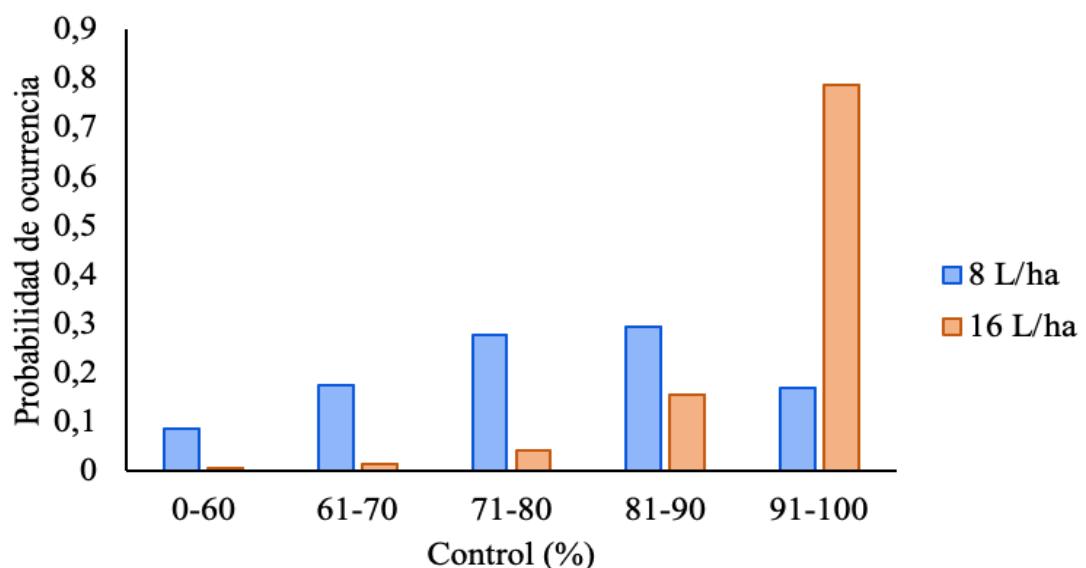


Tabla 10*Media ponderada (% control) de cada variable estudiada a los 17 DPA*

Variables estudiadas	Control (%)
8 L/ha	76 B
16 L/ha	92 A
GM	82 b
GG	89 a

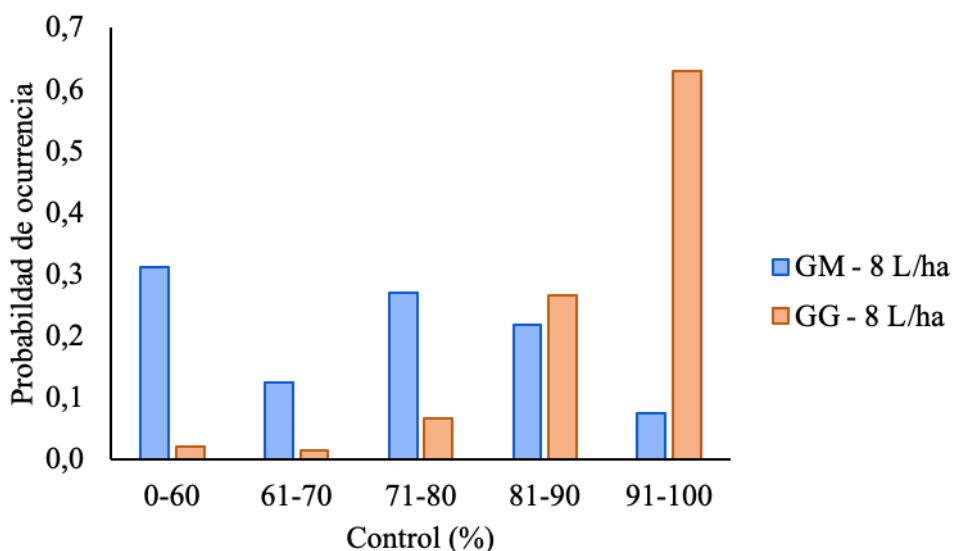
Nota. Medias con una letra común no son significativamente diferentes ($p \geq 0,05$). Letras mayúsculas corresponden a la significancia dentro de volúmenes. Letras minúsculas corresponden a la significancia dentro de tamaño de gota. GM= 250 μ m; GG= 500 μ m.

El control final evaluado a los 27 DPA muestra que el tratamiento con bajo volumen (8 L/ha) y tamaño de gota medio presentó los peores resultados de forma estadísticamente significativa. Tal como se observa en la Tabla 11, el promedio ponderado de control fue de 63%, siendo el mismo apenas suficiente y no teniendo evolución prácticamente desde los 10 DPA. En consecuencia, según las condiciones de nuestro experimento, para el control de la especie objetivo con este herbicida, no se recomienda realizar aplicaciones con estos parámetros. En este control, y a diferencia de lo observado a los 10 DPA, el uso de un volumen bajo (8 L/ha) pone en evidencia la importancia de emplear gotas de mayor tamaño, las cuales permiten alcanzar un control significativamente mayor.

Por otro lado, el mayor volumen de aplicación (16 L/ha) logró muy buenos niveles de control final, independientemente del tamaño de gota utilizado. Este resultado refuerza la relevancia de la tasa de aplicación, la cual se presenta como un factor más determinante que el tamaño de gota en la eficacia del tratamiento.

Figura 17

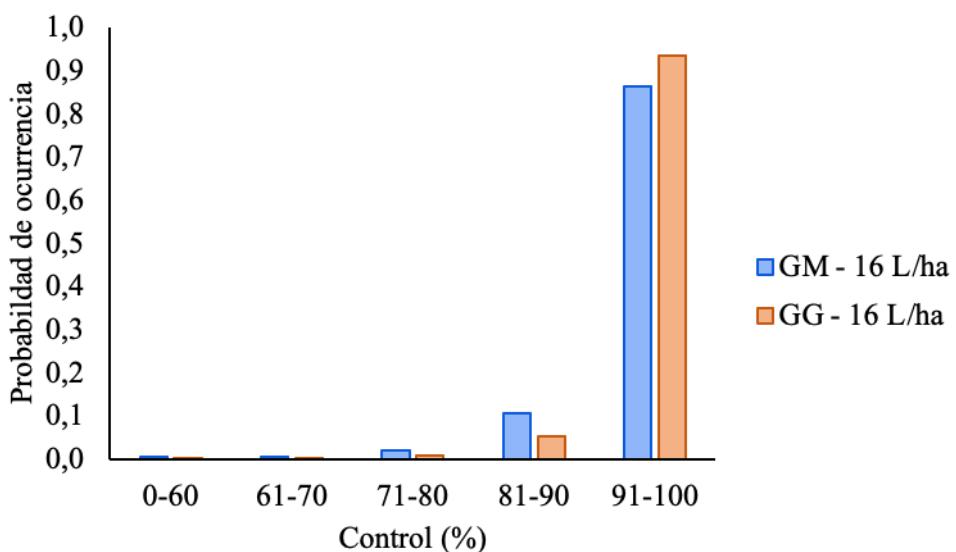
Probabilidad de ocurrencia para la escala de control tratamientos 8 L/ha variando TG (27 DPA)



Nota. TG = tamaño de gota; GM= 250μm; GG= 500μm.

Figura 18

Probabilidad de ocurrencia para la escala de control tratamientos 16 L/ha variando TG (27 DPA)



Nota. TG = tamaño de gota; GM= 250μm; GG= 500μm.

Tabla 11*Media ponderada (% control) de cada interacción a los 27 DPA*

	8 L/ha	16 L/ha
GM	63 Bb	93 Aa
GG	89 Ab	94 Aa

Nota. Medias con una letra común no son significativamente diferentes ($p \geq 0,05$). Letras mayúsculas corresponden a la significancia dentro de volúmenes. Letras minúsculas corresponden a la significancia dentro de tamaño de gota. GM= 250 μ m; GG= 500 μ m.

4.3.2 Experimento 2

En el experimento 2 en el control de Avena, en ambas evaluaciones de control (10 DPA y 17 DPA) no se reportó interacción entre los factores, por lo que los mismos se analizaron de forma independiente. Ambos factores principales determinaron diferencia significativa (Tabla 12).

Tabla 12*Significancia estadística de los factores y su interacción (p-valor) en el control*

Factor	10 DPA	17 DPA
Volumen	< 0.0001	0.0001
Tamaño de gota	0.0001	0.0075
Volumen x Tamaño de gota	0.7882	0.8915

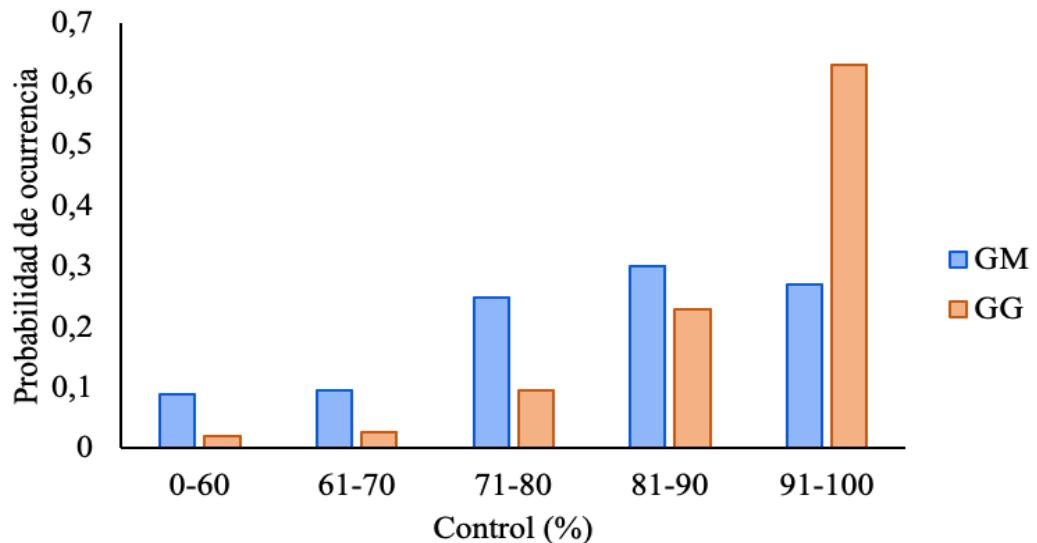
Nota. Valores dentro del cuadro refieren al p-valor.

A los 10 DPA, se destaca que tanto la utilización de gota gruesa (500 μ m) como volumen alto (16 L/ha) generaron un aumento significativo en el porcentaje de control (Tabla 13). Este comportamiento se aprecia en los perfiles de escala de control (Figuras 19 y 20), donde la probabilidad de alcanzar un control muy bueno o excelente alcanzó

aproximadamente el 90%. En contraste, al emplear gotas medias (250 μm) o un volumen bajo (8L/ha), las medias ponderadas son menores y las probabilidades se distribuyen de manera más uniforme, sin una concentración marcada hacia los niveles altos de control.

Figura 19

Control y su probabilidad de ocurrencia analizando factor TG a los 10 DPA



Nota. TG = tamaño de gota; GM= 250 μm ; GG= 500 μm .

Figura 20

Control y su probabilidad de ocurrencia analizando factor volumen a los 10 DP

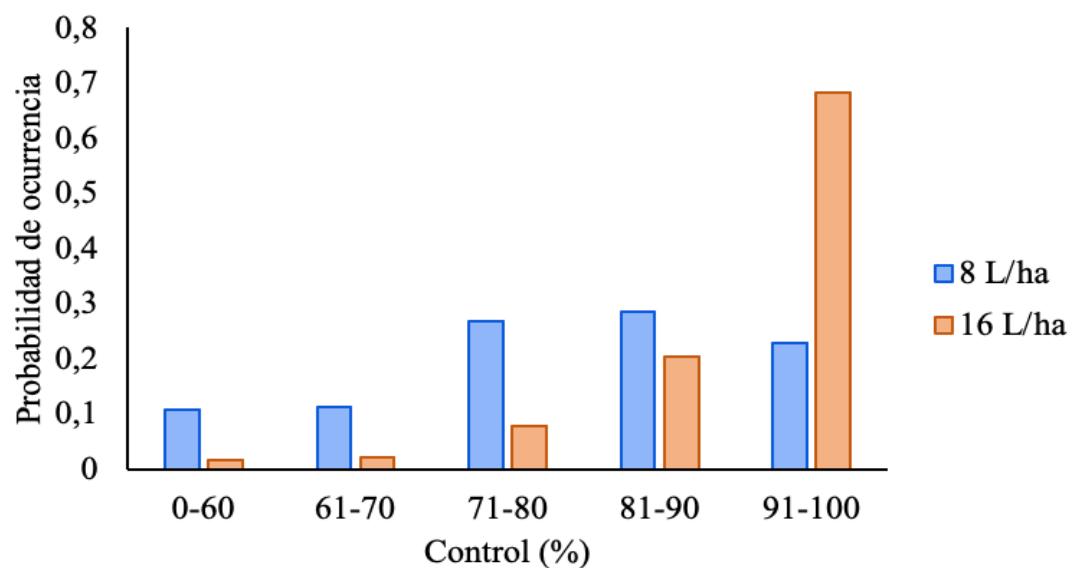


Tabla 13*Media ponderada (% control) de cada variable estudiada a los 10 DPA*

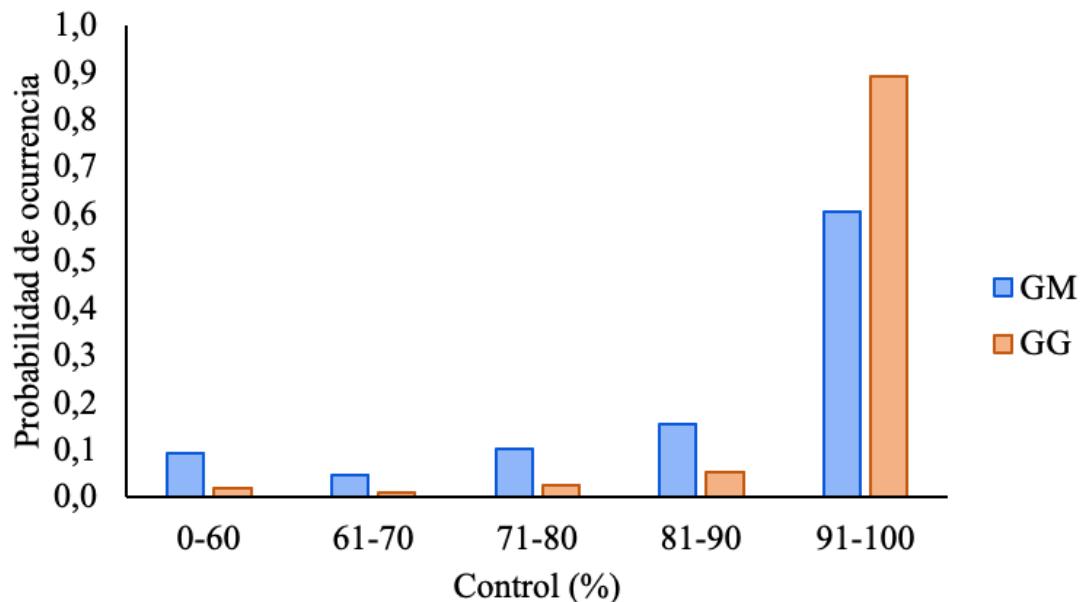
Variables estudiadas	Control (%)
8 L/ha	76 B
16 L/ha	90 A
GM	78 b
GG	89 a

Nota. Medias con una letra común no son significativamente diferentes ($p \geq 0,05$). Letras mayúsculas corresponden a la significancia dentro de volúmenes. Letras minúsculas corresponden a la significancia dentro de tamaño de gota. GM= 250 μ m; GG= 500 μ m.

En el control realizado a los 17 DPA se resalta una evolución positiva, evidenciada por el incremento de las medias ponderadas en todos los tratamientos evaluados (Tabla 14). Se mantiene la mayor eficacia del tratamiento con volumen alto (16 L/ha) o gota gruesa (500 μ m), reafirmando su superior desempeño. Por otra parte, en esta instancia final se destaca una leve ventaja del uso de gotas medias cuando aplicado con volumen de 8 L/ha. Tal como se muestra en las Figuras 21 y 22, al emplear gotas medias la probabilidad de obtener un control bueno/excelente es de aproximadamente 70%, mientras que con un volumen de 8 L/ha esta probabilidad desciende a alrededor de 60%.

Figura 21

Control y su probabilidad de ocurrencia analizando factor TG a los 17 DPA



Nota. TG = tamaño de gota; GM= 250 μ m; GG= 500 μ m.

Figura 22

Control y su probabilidad de ocurrencia analizando factor volumen a los 17 DP

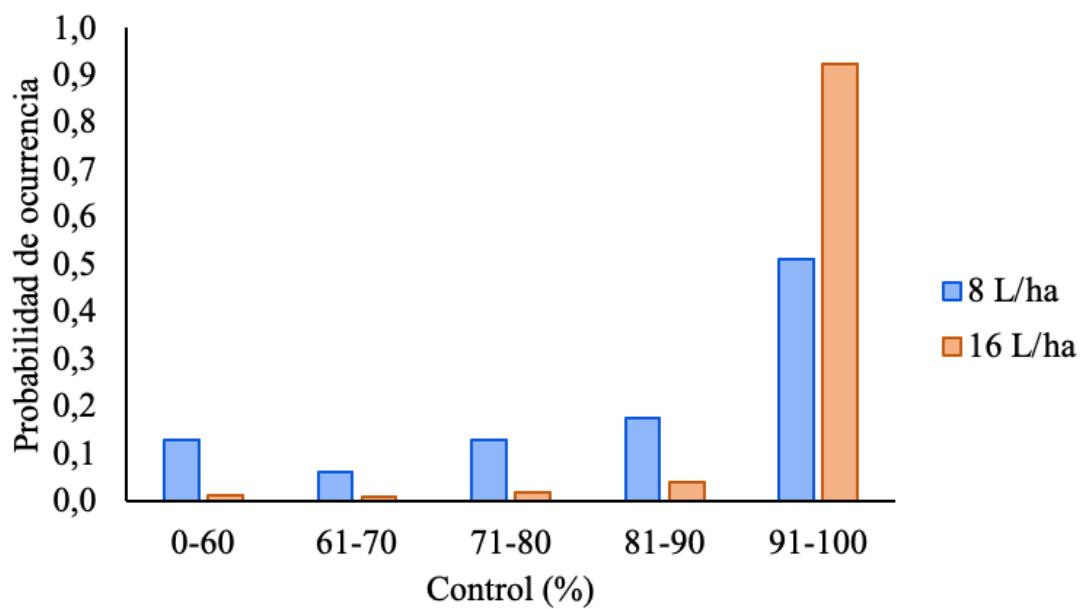


Tabla 14*Media ponderada (% control) de cada variable estudiada a los 17 DPA*

Variables estudiadas	Control (%)
8 L/ha	81 B
16 L/ha	93 A
GM	84 b
GG	92 a

Nota. Medias con una letra común no son significativamente diferentes ($p \geq 0,05$). Letras mayúsculas corresponden a la significancia dentro de volúmenes. Letras minúsculas corresponden a la significancia dentro de tamaño de gota. GM= 250 μ m; GG= 500 μ m.

Considerando la evolución del control en ambos experimentos, existe una tendencia marcada de que se alcanza una mayor eficiencia de control al utilizar un mayor volumen y tamaño de gota. Sin embargo, como fue mencionado en varias oportunidades el factor volumen tiene mayor relevancia que el tamaño de gota. Los resultados obtenidos confirman lo reportado por diversos autores, donde en aplicaciones con dron con volúmenes más altos se logró mayor cobertura y por ende más alto el porcentaje de control (Gubiani et al., 2024; Jeevan et al., 2023; Palacios-Zuñiga et al., 2024; Paul et al., 2024).

Respecto al tamaño de gota, se destaca que cuanto mayor sea el tamaño, menor es el porcentaje de gotas potencialmente derivables, lo cual explica la superioridad de la gota gruesa sobre la media.

En rasgos generales y a excepción del tratamiento de volumen de 8 L/ha y gota media (250 μ m), los controles finales que se alcanzaron fueron muy buenos o excelentes. Al utilizar un herbicida como glufosinato de amonio que presenta escasa translocación se podría esperar que su eficiencia fuera menor. Sin embargo, como comenta Palacios-Zuñiga et al. (2024) el flujo de aire generado por los rotores del dron que favorece la apertura del follaje y por tanto, el contacto con la superficie foliar, pudo haber influido en el nivel de control alcanzado.

4.3.3 NDVI y su relación con el control

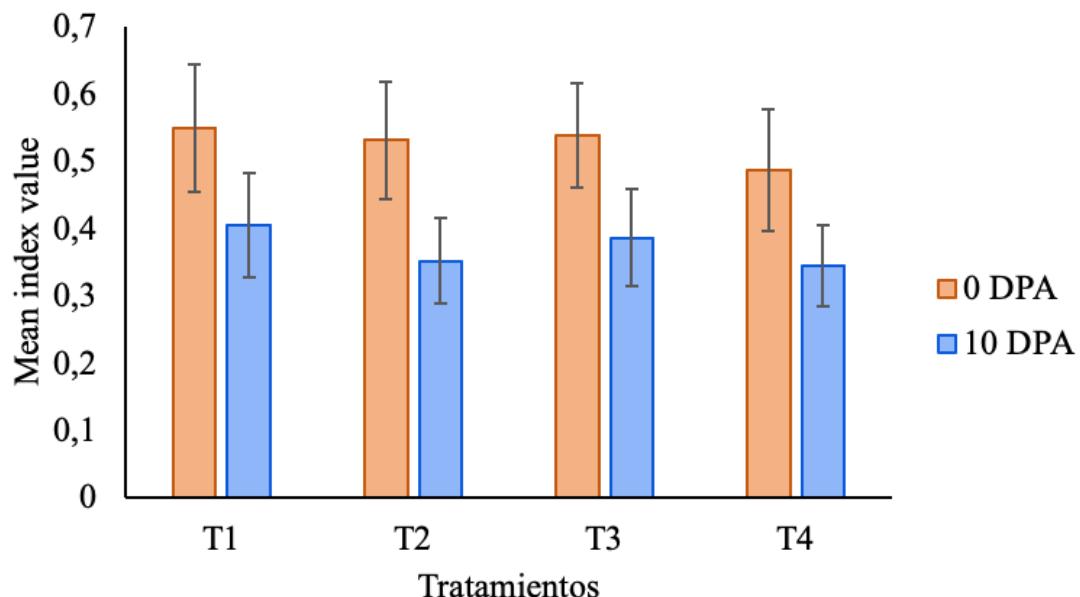
Como fuera comentado anteriormente, además de realizar la evaluación de control a través de estimación visual por los síntomas y senescencia de plantas, también se realizó un diagnóstico mediante el método NDVI, resultados que se presentan a continuación.

Como se puede observar en las figuras 23 y 24 se realizaron dos mediciones en ambos experimentos. Es relevante mencionar que los valores de Mean index value (índice verde) calculados, contemplan únicamente el área efectivamente controlada por el herbicida, no toda el área de cada tratamiento, se descartaron los bordes de cada área.

Considerando el experimento 1, se destaca como en valor absoluto hay un descenso de índice verde a los 10 DPA. Esto era esperable, ya que demuestra que hubo un efecto del herbicida que generó un incremento en la senescencia. Es posible que este descenso no haya sido tan marcado debido a las condiciones meteorológicas post-aplicación que podrían haber influido en la acción del herbicida, donde como ya fue mencionado anteriormente. Además, al tratarse de una pastura perenne y de varios años, presenta mayor proporción de tejidos lignificados, por lo que resulta lógico que requiera de mayor tiempo para disminuir el área verde. Además, coherente a lo que se cuantificó en la escala visual de control, el daño continuó avanzando más allá de esta fecha.

Figura 23

Medición del índice verde (NDVI) en el experimento 1

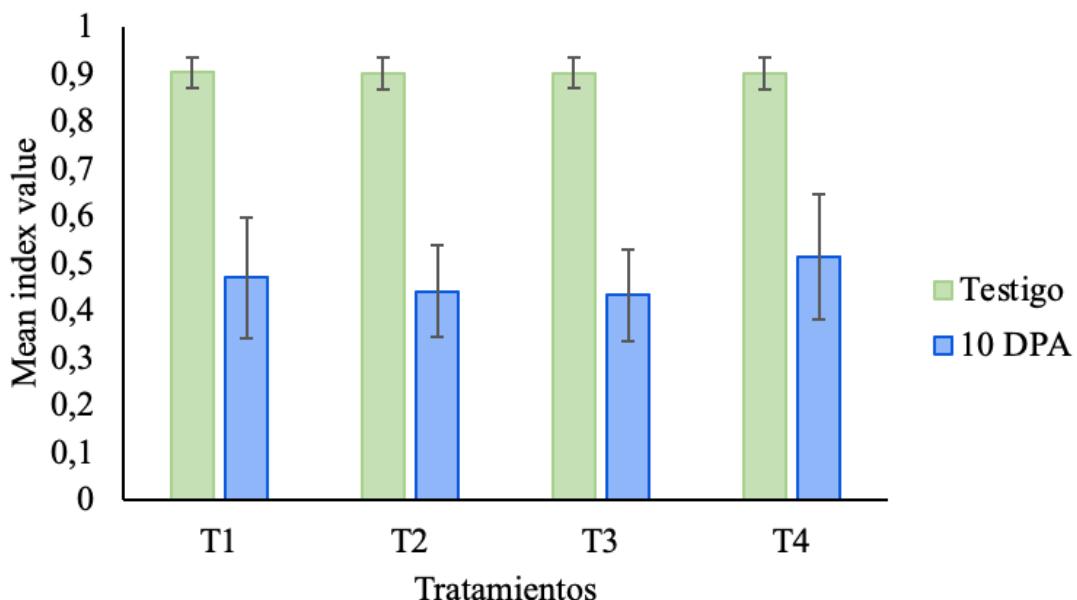


Nota. T1: volumen 8 L/ha y gota 250 μ m; T2: volumen 16 L/ha y gota 250 μ m; T3: volumen 8 L/ha y gota 500 μ m; T4: volumen 16 L/ha y gota 500 μ m. Los desvíos no representan diferencias estadísticas entre tratamientos o días de evaluación, sino la variabilidad de los datos de cada barra en específico.

Respecto al experimento 2, se resalta la misma tendencia de descenso de Mean index value. Sin embargo, dicha reducción presenta una mayor magnitud, lo cual puede atribuirse a diversos factores. En primer lugar, al tratarse de un verdeo de avena, el valor de índice verde del testigo es naturalmente elevado, dado que se trata de una especie suculenta y con bajo contenido de tejido lignificado. Como consecuencia, a los 10 DPA se evidencia una disminución más pronunciada, ya que el cultivo se encuentra en una condición más susceptible a la acción del producto. En segundo lugar, al comparar el NDVI a los 10 DPA con el testigo evaluado la misma fecha, es posible que este último presente un mayor índice de área verde, ya que estuvo más tiempo creciendo y, por lo tanto, pudo encontrarse en un estado más verde. Esto podría haber generado una sobreestimación de dicha magnitud.

Figura 24

Medición del índice verde (NDVI) en el experimento 2



Nota. T1: volumen 8 L/ha y gota 250 μ m; T2: volumen 16 L/ha y gota 250 μ m; T3: volumen 8 L/ha y gota 500 μ m; T4: volumen 16 L/ha y gota 500 μ m. Los desvíos no representan diferencias estadísticas entre tratamientos o días de evaluación, sino la variabilidad de los datos de cada barra en específico.

Al establecer una comparación en el experimento 1 a los 10 DPA entre el control visual y el NDVI se destaca una correlación entre ambos métodos de medición. Los tratamientos de mayor volumen (T2 y T4) son los que alcanzaron un mayor porcentaje de control visual y a su vez presentan un menor valor absoluto de índice verde. Esta relación es coherente, ya que a mayor porcentaje de control hay más proporción de material senescente y por ende menor índice verde. Por otro lado, en los tratamientos con volumen de 8 L/ha (T1 y T3) hubo un menor porcentaje de control visual y mayor índice verde.

Por otro lado, en el experimento 2 no existió una correlación entre el control visual y el NDVI. Dado que no se detectó interacción, pero sí diferencia significativa dentro de los factores principales (tamaño de gota y tasa de aplicación) en el control visual, se hubiera esperado que el tratamiento 1 con menor tamaño de gota (250 μ m) y menor volumen (8 L/ha) presentara un mayor índice de área verde. No obstante, esto no ocurrió, posiblemente debido a la ausencia de una evaluación a los 0 DPA y las inconsistencias observadas en el testigo.

5 CONCLUSIÓN

En las condiciones en las que desarrollaron los experimentos, el volumen de aplicación fue el factor más determinante tanto en la deposición como en control. Los tratamientos con tasa de aplicación de 16 L/ha lograron resultados significativamente superiores en comparación con los de 8 L/ha.

Asimismo, el tamaño de gota desempeñó un papel relevante en la efectividad de las aplicaciones con dron. Las gotas gruesas (500 μ m) mostraron un mejor desempeño, incrementando significativamente la tasa de recuperación tanto en tarjetas como en placas. En contraste, la combinación de bajo volumen y gota media (8 L/ha y 250 μ m) fue la menos eficiente, por lo que las aplicaciones bajo estos parámetros podrían considerarse de alto riesgo.

En ningún tratamiento se llegó al número mínimo de gotas teóricamente necesarias para un herbicida de contacto, de igual modo bajo ciertas configuraciones se obtuvieron controles excelentes. Además, los tratamientos con mayor número de impactos/cm² (gotas 250 μ m) no fueron los de mayor control. Para las condiciones evaluadas fue más relevante la recuperación que el número de impactos.

Cabe destacar que las tasas de recuperación fueron bajas y preocupantes en general, lo que resalta la necesidad de continuar investigando para optimizar la eficiencia de aplicación con drones. Por su parte, el NDVI acompañó parcialmente las tendencias observadas en el control visual para el caso del *Dactylis*, reafirmando su utilidad como herramienta complementaria de evaluación.

En conclusión, para las condiciones en las que fue realizado este experimento el uso de glufosinato de amonio en aplicaciones con dron se mostró para las situaciones de la vegetación de los experimentos, como una alternativa eficiente, con volumen de 16 L/ha y tamaño de gota grande (500 μ m), configuraciones que favorecieron la mayor deposición y un control más efectivo sobre el objetivo.

6 BIBLIOGRAFÍA

- Agriculture Victoria. (2022). *A guide to using agricultural chemicals in Victoria: Ground-based spray application.*
- https://agriculture.vic.gov.au/_data/assets/pdf_file/0010/554923/A-guide-to-using-agricultural-chemicals-in-Victoria-ground-based-spraying_Sept-22.pdf
- Antuniassi, U., Carvalho, F., Chechetto, R., & Mota, A. (2025). *Entendendo a tecnologia de aplicação: Aeronaves Remotamente Pilotadas (ARPs).* FEPAF.
- Artola Guynot de Boismenu, I., & Pérez del Castillo López, J. M. (2024). *Estimación de biomasa de festuca mediante el uso de drone multiespectral* [Trabajo final de grado, Universidad de la República]. Colibri.
- <https://www.colibri.udelar.edu.uy/jspui/bitstream/20.500.12008/47432/1/Artola%c3%b1aki.pdf>
- Bah, M. D., Hafiane, A., & Canals, R. (2018). Deep learning with unsupervised data labeling for weed detection in line crops in UAV images. *Remote Sensing*, 10(11), Artículo e1690. <https://doi.org/10.3390/rs10111690>
- Carvalho, F., Chechetto, R., Mota, A., & Antuniassi, U. (2021). *Entendendo a tecnologia de aplicação: Aviões, helicópteros e drones de pulverização* (2^a ed.). FEPAF.
- da Cunha, J. P. A. R., Lopes, L. de L., Alves, C. O. R., & de Alvarenga, C. B. (2024). Spray deposition and losses to soil from a remotely piloted aircraft and airblast sprayer on coffee. *AgriEngineering*, 6(3), 2385-2394.
- <https://doi.org/10.3390/agriengineering6030139>
- Dengeru, Y., Ramasamy, K., Allimuthu, S., Balakrishnan, S., Kumar, A. P. M., Kannan, B., & Karuppasami, K. M. (2022). Study on Spray deposition and drift characteristics of UAV agricultural sprayer for application of insecticide in redgram crop (*Cajanus cajan* L. Millsp.). *Agronomy*, 12(12), Artículo e3196.
- <https://doi.org/10.3390/agronomy12123196>
- Gao, J., Liao, W., Nuyttens, D., Lootens, P., Xue, W., Alexandersson, E., & Pieters, J. (2024). Cross-domain transfer learning for weed segmentation and mapping in precision farming using ground and UAV images. *Expert Systems with Applications*, 246, Artículo e122980. <https://doi.org/10.1016/j.eswa.2023.122980>

- Gatkal, N. R., Nalawade, S. M., Bhanage, G. B., Sahni, R. K., Walunj, A. A., Kadam, P. B., & Ali, M. (2025). Review of UAVs for efficient agrochemical spray application. *International Journal of Agricultural & Biological Engineering*, 18(1), 1-9. <https://doi.org/10.25165/j.ijabe.20251801.8979>
- Gubiani, P., Simoes, J. A., Gregio, M. H., Leal, J. F., Romancini, M., Machado, G. P., & Junior, S. T. (2024). Uso do herbicida Triclon no controle de soja tiguera aplicado via terrestre e via drone. En C. A. Carbonari & L. Tropaldi (Eds.), *Anais do XXXIII Congresso Brasileiro da Ciência das Plantas Daninhas e XXV Congresso Latinoamericano de Malezas* (p. 874). Sociedade Brasileira da Ciência das Plantas Daninhas.
- Hussain, S., Masud Cheema, M. J., Arshad, M., Ahmad, A., Latif, M. A., Ashraf, S., & Ahmad, S. (2019). Spray uniformity testing of unmanned aerial spraying system for precise agro-chemical applications. *Pakistan Journal of Agricultural Sciences*, 56(4), 897-903. https://www.researchgate.net/publication/333175825_Spray_uniformity_testing_of_unmanned_aerial_spraying_system_for_precise_agro-chemical_applications
- Jastrombek, J. P., Schelter, M. L., Comachio, L. B., de Freitas, L., Camintia, L. L., Marquez, J. F., & de Oliveira, A. M. (2024). Eficiência de aplicação com ARP para misturas de herbicidas no controle de nabiça (*Raphanus raphanistrum*). En C. A. Carbonari & L. Tropaldi (Eds.), *Anais do XXXIII Congresso Brasileiro da Ciência das Plantas Daninhas e XXV Congresso Latinoamericano de Malezas* (p. 858). Sociedade Brasileira da Ciência das Plantas Daninhas.
- Jeevan, N., Pazhanivelan, S., Kumaraperumal, R., Ragunath, K., Arthanari, P. M., Sritharan, N., Karthikkumar, A., & Manikandan, S. (2023). Effect of different herbicide spray volumes on weed control efficiency of a battery-operated Unmanned aerial vehicle sprayer in transplanted rice (*Oryza sativa* L.). *Journal of Applied & Natural Science*, 15(3), 972-977. <https://doi.org/10.31018/jans.v15i3.4753>
- Kawamura, K., Asai, H., Yasuda, T., Soisouvanh, P., & Phongchanmixay, S. (2021). Discriminating crops/weeds in an upland rice field from UAV images with the SLIC-RF algorithm. *Plant Production Science*, 24(2), 198-215. <https://doi.org/10.1080/1343943X.2020.1829490>

- Khan, N., Ray, R. L., Sargani, G. R., Ihtisham, M., Khayyam, M., & Ismail, S. (2021). Current progress and future prospects of agriculture technology: Gateway to sustainable agriculture. *Sustainability*, 13(9), Artículo e4883. <https://doi.org/10.3390/su13094883>
- Lewis, K. A., Tzilivakis, J., Warner, D. J., & Green, A. (2016). An international database for pesticide risk assessments and management. *Human and Ecological Risk Assessment: An International Journal*, 22(4), 1050-1064. <https://doi.org/10.1080/10807039.2015.1133242>
- Liu, S. H., Campbell, R. A., Students, J., & Wagner, R. G. (1996). Absorption and translocation of Glyphosate in Aspen (*Populus tremuloides* Michx.) as influenced by droplet size, droplet number, and herbicide concentration. *Weed Science*, 44(3), 482-488. <https://doi.org/10.1017/S0043174500094224>
- Newsroom Infobae. (2025, 30 de abril). El informe anual de DJI Agriculture revela la revolución agrícola impulsada por drones en el Agrishow 2025 de Brasil. Infobae. <https://www.infobae.com/america/agencias/2025/04/30/el-informe-anual-de-dji-agriculture-revela-la-revolucion-agricola-impulsada-por-drones-en-el-agrishow-2025-de-brasil/>
- Olivares, B. O., & López-Beltrán, M. A. (2019). Índice de vegetación de diferencia normalizada aplicado al territorio indígena agrícola de Kashaama, Venezuela. *Cuadernos de Investigación UNED*, 11(2), 112-121. <https://doi.org/10.22458/urj.v11i2.2299>
- Palacios-Zuñiga, R. M., Polito, R. A., Araújo, B. O. N., Schröder, E. P., Burkert, V. G., Avila, L. A., & Camargo, E. R. (2024). Is herbicide applied using drones as efficient as when applied using terrestrial systems? *Advances in Weed Science*, 42, Artículo e020240010. <http://doi.org/10.51694/AdvWeedSci/2024;42:00022>
- Paul, R. A. I., Palanisamy, M. A., Peramaiyan, P., Kumar, V., Bagavathiannan, M., Gurjar, B., Vijayakumar, S., Djanaguiraman, M., Pazhanivelan, S., & Ramasamy, K. (2024). Spray volume optimization with UAV-based herbicide application for effective droplet deposition and weed control in direct-seeded rice. *Frontiers in Agronomy*, 6, Artículo e1491842. <https://doi.org/10.3389/fagro.2024.1491842>

Seibt, T. A., Boller, W., Ulguim, A., Neto, R., Lopes, L., & Melo, A. (2025). Herbicide florpyrauxifen-benzyl via drone with different nozzles and spray volumes for weed control in rice crops. *Ciência Rural*, 55(7), Artículo e20240187.
<https://doi.org/10.1590/0103-8478cr20240187>

Se expande la utilización de drones agrícolas en el mercado uruguayo. (2024, 25 de marzo). *Revista Verde*, (113). <https://revistaverde.com.uy/agricultura/se-expande-la-utilizacion-de-drones-agricolas-en-el-mercado-uruguayo/>

Shaner, D. L., Jachetta, J. J., Senseman, S., Burke, I., Hanson, B., Jugulam, M., Tan, S., Reynolds, J., Strek, H., McAllister, R., Green, J., Glenn, B., Turner, P., & Pawlak, J. (2014). *Herbicide handbook* (10th ed.). Weed Science Society of America. <https://wssa.net/wp-content/uploads/Christian-Willenborg-herbicide-handbook-2014.pdf>

Silva, G., Carvalho, F., Santos, M., Vieria M., Silva, T., & Antuniasi, U. (2024, 19 de septiembre). *Influência da velocidade de voo na largura de faixa para um drone modelo T20P em dois volumes de aplicação*.
<https://revistaavag.org.br/influencia-da-velocidade-de-voo-na-largura-de-faixa-para-um-drone-modelo-t20p-em-dois-volumes-de-aplicacao/>

Stehr, N. J. (2015). Drones: The newest technology for precision agriculture. *Natural Sciences Education*, 44(1), 89-91. <https://doi.org/10.4195/nse2015.04.0772>

Stoletniy, I. V. (2013). *Tamaño de gota, volumen de aplicación y uso de adyuvantes en la deposición del pulverizado y el control de mancha amarilla causada por Pyrenophora tritici-repentis en trigo* [Tesis de maestría, Universidad de la República]. Colibri. <https://www.colibri.udelar.edu.uy/jspui/bitstream/20.500.12008/1863/1/0105sto.pdf>

Takano, H. K., Beffa, R., Preston, C., Westra, P., & Dayan, F. E. (2020). Physiological factors affecting uptake and translocation of Glufosinate. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, 68(10), 3026-3032.
<https://doi.org/10.1021/acs.jafc.9b07046>

Torres-Sánchez, J., López-Granados, F., De Castro, A. I., & Peña-Barragán, J. M. (2013). Configuration and specifications of an Unmanned Aerial Vehicle (UAV) for early site specific weed management. *PLoS ONE*, 8(3), Artículo e58210.
<https://doi.org/10.1371/journal.pone.0058210>

- Wang, D., Li, W., Liu, X., Li, N., & Zhang, C. (2020). UAV environmental perception and autonomous obstacle avoidance: A deep learning and depth camera combined solution. *Computers and Electronics in Agriculture*, 175, Artículo e105523. <https://doi.org/10.1016/j.compag.2020.105523>
- Wang, G., Han, Y., Li, X., Andaloro, J., Chen, P., Hoffmann, W. C., Han, X., Chen, S., & Lan, Y. (2020). Field evaluation of spray drift and environmental impact using an agricultural unmanned aerial vehicle (UAV) sprayer. *Science of the Total Environment*, 737, Artículo e139793. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2020.139793>
- Zaman-Allah, M., Vergara, O., Araus, J. L., Tarekegne, A., Magorokosho, C., Zarco-Tejada, P. J., Hornero, A., Albà, A. H., Das, B., Craufurd, P., Olsen, M., Prasanna, B. M., & Cairns, J. (2015). Unmanned aerial platform-based multispectral imaging for field phenotyping of maize. *Plant Methods*, 11, Artículo e35. <https://doi.org/10.1186/s13007-015-0078-2>
- Zarco-Tejada, P. J., González-Dugo, V., & Berni, J. A. J. (2012). Fluorescence, temperature and narrow-band indices acquired from a UAV platform for water stress detection using a micro-hyperspectral imager and a thermal camera. *Remote Sensing of Environment*, 117, 322-337. <https://doi.org/10.1016/j.rse.2011.10.007>
- Zhang, P., Deng, L., Lyu, Q., He, S., Yi, S., Liu, Y., Yu, Y., & Pan, H. (2016). Effects of citrus tree-shape and spraying height of small unmanned aerial vehicle on droplet distribution. *International Journal of Agricultural & Biological Engineering*, 9(4), 45-52. <https://doi.org/10.3965/j.ijabe.20160904.2178>
- Zhu, H., Salyani, M., & Fox, R. D. (2011). A portable scanning system for evaluation of spray deposit distribution. *Computers and Electronics in Agriculture*, 76(1), 38-43. <https://doi.org/10.1016/j.compag.2011.01.003>